

SIMULAÇÃO DA COMBUSTÃO DE CARVÃO PULVERIZADO EM UM COMBUSTOR CICLÔNICO

Fábio Alfaia da Cunha

alfaia@ufpa.br

Said Mounsif

smounsif@ufpa.br

Severiano da Silva Lima Filho

lima@ufpa.br

Marcio Ferreira Martins

marciofm@ufpa.br

Departamento de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Pará. Rua Augusto Corrêa, Guamá, Belém – PA – Brasil, CEP: 66075-110

Resumo. *O estudo da queima de carvão pulverizado é de suma importância, principalmente porque o perfeito entendimento dos processos envolvidos em sua combustão podem proporcionar o desenvolvimento de tecnologias que proporcionem a redução dos níveis de emissão de poluentes para a atmosfera. Neste trabalho é feita a simulação numérica da combustão de carvão pulverizado em um combustor ciclônico utilizando o código comercial FLUENT. O uso de um código robusto e confiável é essencial neste tipo de estudo dada a natureza tridimensional do escoamento e das reações no interior da câmara ciclônica. Para a simulação do escoamento reagente turbulento na câmara é utilizado o modelo de combustão Presumed PDF com o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ RNG. Dentre alguns resultados que são mostrados pode-se citar perfis de temperatura e de velocidade em diversos planos selecionados.*

Palavras-chave: *Combustão de carvão pulverizado, combustor ciclônico, simulação computacional, modelo de combustão Presumed PDF*

1. INTRODUÇÃO

Existe um número grande de fornos para produção de carvão na região Amazônica. Durante o manuseio e transporte de carvão grande parte do mesmo é convertida em finos. A queima destes finos pode ser feita de forma eficiente em combustores ciclônicos. Neste caso, os produtos quentes do combustor ciclônico fluem em uma caldeira de parede d'água com seção convectiva associada. Essa energia pode ser utilizada para os mais diversos fins.

O combustor ciclônico é basicamente uma câmara cilíndrica horizontal na qual carvão pulverizado queima em um movimento ciclônico devido o ar que é introduzido tangencialmente ao combustor. As superfícies do combustor estão cobertas com refratário de forma que temperaturas de gás de cerca de 1650°C são alcançadas. Esta temperatura é suficiente para derreter a cinza em uma escória fundida que forma nas paredes de cilindro (Ragland, 1998). A combustão ciclônica é uma alternativa principal a queima em suspensão convencional. Na combustão ciclônica, a queima acontece a uma pressão positiva, no lugar da leve pressão negativa associada com os sistemas de

combustão de carvão pulverizados. O carvão, tipicamente pulverizado $<80\mu\text{m}$ (embora carvão esmagado para $< 6,35\text{mm}$ seja usado em algumas fornalhas), é soprado no queimador ciclônico onde ele devolatiliza imediatamente. A ação centrífuga força as partículas para a parede cilíndrica do queimador onde a oxidação de *char* acontece na camada limite perto da parede (Tillm, 1991). O vigor com que a ação ciclônica acontece, forçando as partículas de carvão para a parede de ciclone, não só facilita a combustão rápida, mas também a remoção de produtos sólidos. Fornalhas ciclônicas removem 70% dos produtos sólidos de combustão tipicamente como escória, batida da própria fornalha. Só aproximadamente 30% dos produtos sólidos de saída de combustão da fornalha entram na caldeira e são removidos como “fly ash”. Esta redistribuição dos produtos sólidos de combustão facilita o uso de caldeiras menores com taxas mais altas de liberação de calor e espaçamentos de tubo menores do que sistemas convencionais (Tillm, 1991; Ragland, 1998).

O volume da fornalha deve ser grande o bastante para permitir a queima de *char*. Altas emissões de óxido de nitrogênio restringem o uso de combustores ciclônicos. Porém, recentes desenvolvimentos mostraram que a combustão “staged” pode controlar a formação de óxido de nitrogênio durante combustão (Ragland, 1998).

2. MODELOS MATEMÁTICOS DA FASE GASOSA

2.1 Modelamento do Escoamento Turbulento

Considerando o caso de um escoamento estacionário e incompressível com viscosidade constante, a descrição do escoamento turbulento pode ser feita pela equação da conservação da massa e pelas equações de Reynolds. Tais equações governantes podem ser escritas em uma forma de tensor cartesiana como:

Equação da conservação da massa:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Equações de Reynolds:

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (2)$$

As equações de Reynolds precisam de equações adicionais para que possam ser resolvidas. O fechamento é realizado através dos modelos de turbulência que fornecem os termos adicionais. Um método comum para o fechamento das equações de Reynolds emprega a hipótese de Boussinesq para relacionar as tensões de Reynolds aos gradientes de velocidade média. Esta aproximação é usada no modelo k- ϵ . A vantagem desta aproximação é o custo computacional relativamente baixo associado com a computação da viscosidade turbulenta, μ_t . No modelo k- ϵ , duas equações de transporte adicionais (para a energia cinética turbulenta, k, e para taxa de dissipação turbulenta, ϵ) são resolvidas e a μ_t é computada como uma função de k e ϵ . Neste trabalho é utilizado uma variante do modelo k- ϵ tradicional desenvolvido por Orszag *et al.* (1993) através da Teoria de Grupo de Renormalização chamado de k- ϵ RNG. Neste modelo é utilizada uma técnica de eliminação de escalas aplicada às equações de Navier-Stokes. As constantes e funções que aparecem no modelo são obtidas teoricamente, e não empiricamente como no caso do modelo k- ϵ tradicional.

2.2 Modelo de Combustão Presumed PDF (prePDF)

O modelo prePDF é baseado na solução de equações de transporte para um ou dois escalares conservados (as frações de mistura, f , e/ou sua variância, $\overline{f'^2}$). A fração de mistura pode ser escrita em termos de fração de massa atômica como:

$$f = \frac{Z_i - Z_{i,ox}}{Z_{i,fuel} - Z_{i,ox}} \quad (3)$$

Onde Z_i é a fração de massa elementar para algum elemento, i . O subscrito **ox** denota o valor na entrada do fluxo oxidante e o subscrito **fuel** denota o valor na entrada do fluxo de combustível. Se os coeficientes de difusão para todas as espécies são iguais, então a eq. (3) é idêntica para todos os elementos, e a definição de fração de mistura é única.

2.2.1 Equações de Transporte para a Fração de Mistura

Sob a hipótese de difusividades iguais, as equações de espécies podem ser reduzidas a uma única equação para a fração de mistura, f . Enquanto a hipótese de difusividades iguais é problemática para escoamentos laminares, ela é geralmente aceitável para escoamentos turbulentos onde a convecção turbulenta oprime a difusão molecular. A equação da fração de mistura média no tempo é:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{f}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{f}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f} \right) + S_m \quad (4)$$

O termo fonte S_m é devido somente à transferência de massa na fase gasosa das partículas reagentes (carvão). Além da solução para a fração de mistura média, é deve-se resolver uma equação conservativa para a variância de fração de mistura, $\overline{f'^2}$:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{f'^2}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \overline{f'^2}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \overline{f'^2} \right) + C_g \mu_t (\nabla^2 \bar{f}) - C_d \rho \frac{\varepsilon}{\kappa} \overline{f'^2} \quad (5)$$

Onde $f' = f - \bar{f}$. As constantes σ_t , C_g e C_d tomam os valores 0.85, 2.86 e 2.0, respectivamente.

A variância de fração de mistura é usada no modelo de fechamento que descreve interações química-turbulência. Este único escalar conservado f no campo é determinado. Outros escalares importantes podem ser derivados sem resolver equação de transporte individual de acordo com o modelo de equilíbrio. Porém no escoamento reagente turbulento, não só os valores instantâneos, mas também os valores médios no tempo dos escalares de escoamento são extensamente procurados, uma função de densidade de probabilidade (PDF) é introduzida para responder pela interação químico-turbulenta.

Este PDF descreve a fração de tempo que a fração de mistura variável flutuante assume em um valor entre f e $f + \Delta f$. Ele pode ser escrito como:

$$p(f) \Delta f = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_i \tau_i \quad (6)$$

onde τ_i é a fração de tempo que f gasta na banda Δf . A forma da função $p(f)$ depende da natureza das flutuações turbulentas em f . O PDF descreve a flutuação temporal de f no escoamento turbulento. Quando o $p(f)$ é determinado a cada posição, ele pode ser usado como uma função ponderada para calcular os valores médios no tempo de concentrações de espécies, densidade e temperatura usando a equação integral como segue:

$$\bar{\phi}_i = \int_0^t p(f) \phi_i(f) df \quad (7)$$

Geralmente, $p(f)$ é representado pela função β que é determinada pelas seguintes funções:

$$p(f) = \frac{f^{\alpha-1}(1-f)^{\beta-1}}{\int f^{\alpha-1}(1-f)^{\beta-1} df} \quad (8)$$

Onde:

$$\alpha = \bar{f} \left[\frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{\bar{f}'^2} - 1 \right] \quad e \quad \beta = (1-\bar{f}) \left[\frac{\bar{f}(1-\bar{f})}{\bar{f}'^2} - 1 \right]$$

3. MODELOS DA FASE SÓLIDA

O escoamento de partículas de carvão pulverizado é modelado pelo FLUENT usando o modelo chamado “**Discrete phase**”. O modelo prediz as trajetórias de partículas individuais de carvão, cada uma representando um fluxo contínuo (ou escoamento de massa) de carvão. Transferência de calor, quantidade de movimento, massa entre carvão e gás são incluídos através da computação alternada das equações de trajetória da fase discreta e da fase gasosa contínua.

3.1 Modelo de Devolatilização

O modelo de devolatilização adotado utiliza duas reações concorrentes de primeira ordem e irreversíveis. Este modelo foi desenvolvido por Kobayashi *et al.* (1976) e tem se mostrado bastante eficiente, por isso é largamente utilizado nos trabalhos atuais como é o caso dos trabalhos de Veras (1997) e Costa (2002). As expressões das taxas de devolatilização cinética na forma proposta por Kobayashi *et al.* (1976) são dadas por $\mathfrak{R}_2 = A_2 e^{-(E_2/RT_p)}$ e $\mathfrak{R}_1 = A_1 e^{-(E_1/RT_p)}$. Onde \mathfrak{R}_1 e \mathfrak{R}_2 são taxas concorrentes que podem controlar a devolatilização sobre diferentes faixas de temperatura. As duas taxas cinéticas são empregadas na expressão de devolatilização como segue:

$$\frac{m_v(t)}{(1-f_{w,0})m_{p,0} - m_a} = \int_0^t (\alpha_1 \mathfrak{R}_1 + \alpha_2 \mathfrak{R}_2) \exp\left(-\int_0^t (\mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_2) dt\right) dt \quad (9)$$

Onde $m_v(t)$ é o rendimento de voláteis acima de um tempo t , $m_{p,0}$ é a massa inicial da partícula na injeção, α_1, α_2 são os fatores de rendimento e m_a é o conteúdo de cinzas na partícula.

Os parâmetros cinéticos em \mathfrak{R}_1 e \mathfrak{R}_2 são $A_1=2.10^5(1/s)$, $E_1=104,6.10^6(J/kmol)$, $A_2=1,3.10^7(1/s)$, $E_2=167,4.10^6(J/kmol)$. Os fatores de rendimento α_1 e α_2 adotados são 0,4 e 0,8 respectivamente. O diâmetro da partícula de carvão aumenta durante a devolatilização de acordo com o coeficiente aumento (swelling), C_{sw} , que para o cálculo foi assumido igual a 2.

3.2 Reação heterogênea de superfície (Combustão do Carbono fixo)

Após a devolatilização ter sido completada são iniciadas as reações de combustão na superfície da partícula. A reação de superfície consome as espécies oxidantes na fase gasosa; isto é, fornece um termo fonte (negativo) durante a computação da equação de transporte para estas espécies. Similarmente, a reação de superfície é uma fonte de espécies na fase gasosa: O produto da reação de superfície heterogênea aparece na fase gasosa como uma espécie química. Para este trabalho as reações heterogêneas superficiais são determinadas tanto pela taxa cinética (eq. 10) quanto pela difusiva (eq. 11). A taxa de combustão é dada na eq. (12).

$$\mathfrak{R} = C_2 e^{-(E/RT_p)} \quad (10)$$

$$D_0 = C_1 \frac{[(T_p + T_\infty)/2]^{0.75}}{d_p} \quad (11)$$

$$\frac{dm_p}{dt} = -A_p p_{ox} \frac{D_0 \mathfrak{R}}{D_0 + \mathfrak{R}} \quad (12)$$

Onde A_p é a área superficial partícula (πd_p^2), p_{ox} é a pressão parcial da espécie oxidante no gás envolvente a partícula de combustão, e a taxa cinética, \mathfrak{R} , incorpora os efeitos da reação química na superfície interna da partícula de carbono fixo e difusão porosa.

4. GEOMETRIA DA CÂMARA DE QUEIMA CICLÔNICA

A geometria do combustor ciclônico é mostrada nas figuras 1(a) e 1(b). Na figura 1(a) é mostrada uma vista em perspectiva da câmara, já na fig. 1(b) são mostrados duas vistas, uma frontal e outra superior. Na vista superior verifica-se melhor o duto de entrada de ar e carvão. Para esta câmara, o carvão deve estar pulverizado para que possa ser transportado para interior do combustor pelo arraste do escoamento. A geometria utilizada é a de um câmara de queima ciclônica que está sendo construída no Laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará.

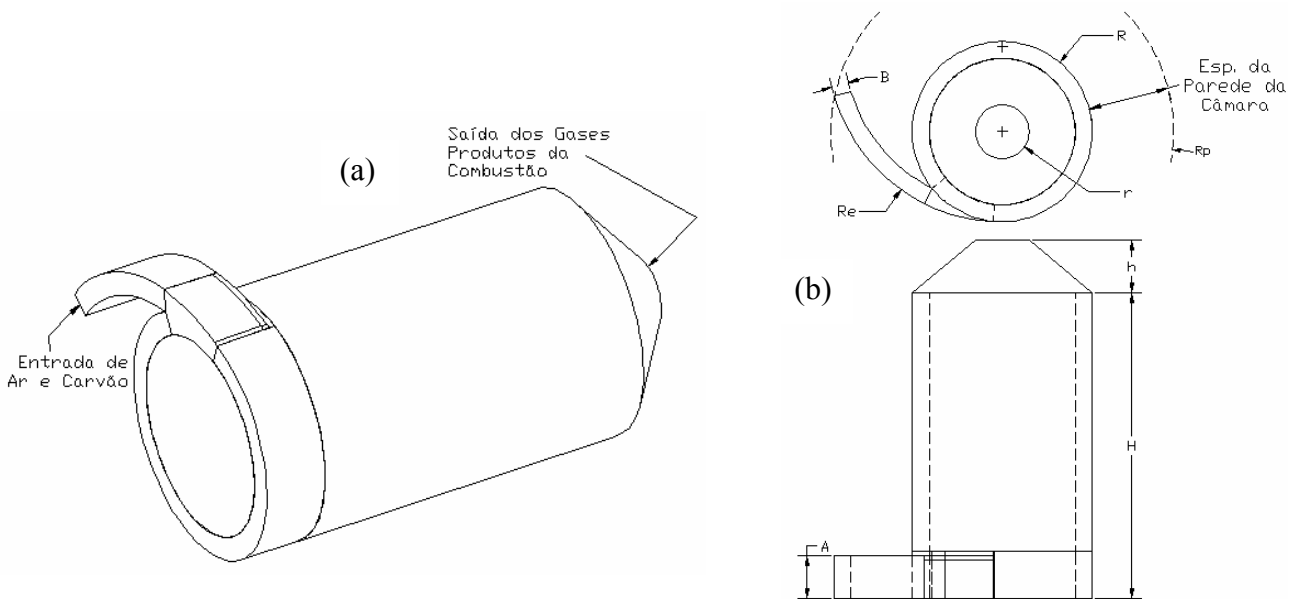


Figura 1. Vista em Perspectiva (a) e Vista frontal e superior da câmara de ciclônica (b).

Os parâmetros mostrados no desenho têm os seguintes valores: $A=0,2\text{m}$, $B=0,08\text{m}$, $H=1,205\text{m}$, $h=0,295\text{m}$, $r=0,125\text{m}$, $R=0,42\text{m}$, $Re=0,816\text{m}$, $Rp=0,8\text{m}$.

5. MALHAGEM DA GEOMETRIA DA CÂMARA DE QUEIMA CICLÔNICA

A geometria da câmara é composta de oito partes, fig. 2(a). Esta divisão do domínio em partes é necessária para que se possa gerar uma malha que se adapte melhor a geometria da câmara. O sólido P4, fig. 2(b), apresenta uma área com uma das arestas bastante aguda, o que dificulta o processo de malhagem nesta região. Neste volume são utilizados elementos tetraédricos que conseguem se adaptar aos cantos agudos. Os sólidos P1, P3 e P7 são discretizados com elementos

hexaédricos dispostos na forma mostrada na figura 3(b), esta disposição dos elementos próximos da parede propicia melhores resultados. Já nos sólidos P5, P6 e P8 também são utilizados elementos hexaédricos, mas com o objetivo de se reduzir o número de elementos necessários para a discretização. O uso de elementos tetraédricos nesta região aumentaria muito o número de elemento para representar o mesmo domínio. No cone de saída da câmara (sólido P8) é utilizada uma malha semelhante a dos sólidos P1, P3 e P7.

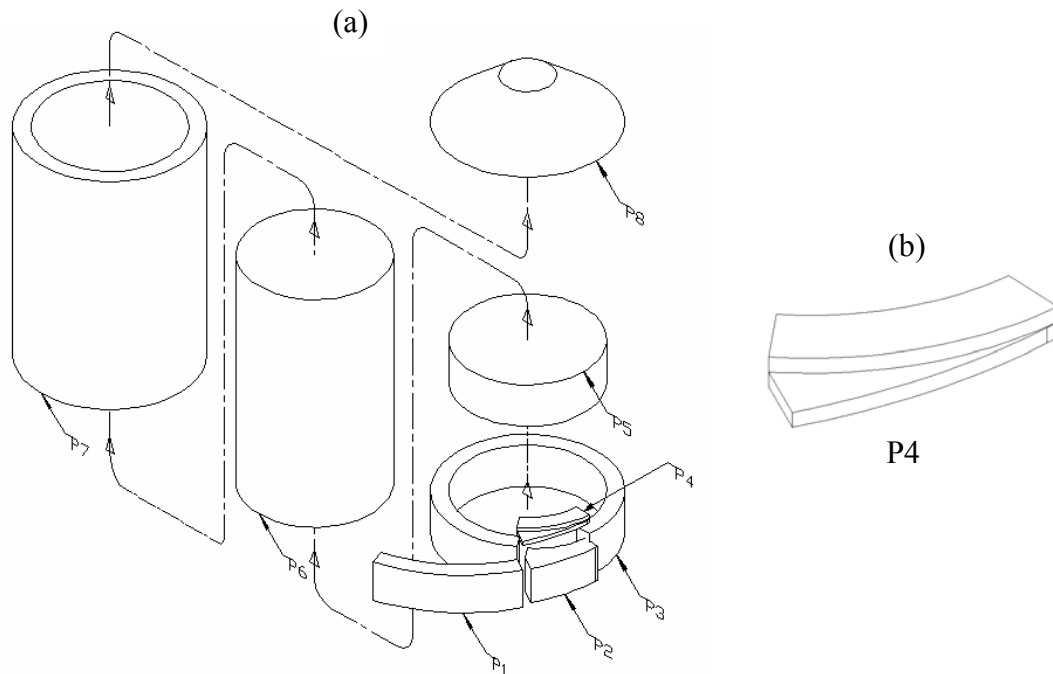


Figura 2. Volumes que compõe a geometria da câmara de queima ciclônica (a). Vista separada do sólido P4 (b).

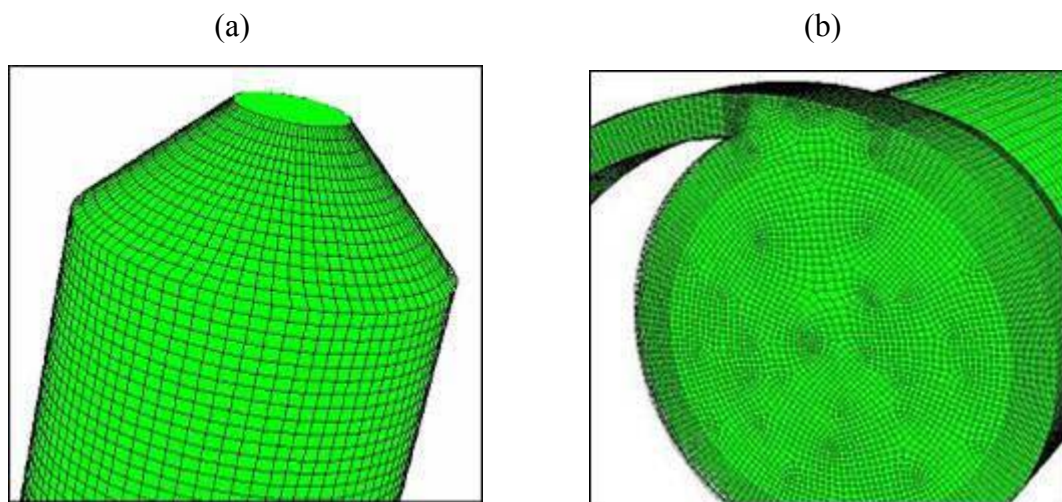


Figura 3. Cone de saída dos gases (a) e perspectiva da parte inferior da Queima Ciclônica (b).

6. CONDIÇÕES DE CONTORNO E COMPOSIÇÃO DO COMBUSTÍVEL

Nesta parte são descritas as condições de contornos utilizadas e a composição do combustível sólido. As paredes do combustor são consideradas isotérmicas e assumem o valor de 850°C. É considerada uma velocidade 42 m/s, constante na superfície de entrada. Na saída do combustor é considerado um perfil constante de pressão. A temperatura inicial do ar e do carvão que entram no

combustor é de 36°C. A injeção de carvão é considerada uniforme sobre a superfície de entrada de ar. O diâmetro da partícula de carvão é de 100µm. A vazão mássica de carvão é de 0,16kg/s e a de ar de 0,222kg/s. A composição do combustível é a de um carvão betuminoso extraída do trabalho de Costa (2002). Da análise aproximada, tem-se: $Y_C=0,696$ (Fração de massa do carbono), $Y_V=0,194$ (Fração de massa dos voláteis) e $Y_R=0,011$ (Fração de massa dos resíduos). A composição dos voláteis é dada por $Y_{CH_4}=0,4375$, $Y_{C_6H_6}=0,4125$, $Y_{O_2}=0,0375$, $Y_{CO}=0,075$ e $Y_{CO_2}=0,0375$. Para a simulação são consideradas 13 espécies químicas: H_2O , H_2 , OH , H , O , O_2 , N , $C(s)$, CO , CO_2 , CH_4 , C_6H_6 , N_2 .

7. SOLUÇÃO NUMÉRICA

As simulações numéricas foram executadas no código de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) FLUENT v.6.1. As equações governantes são resolvidas utilizando o método de volumes finitos em um sistema de malhas não-estruturadas. O algoritmo acoplamento pressão-velocidade empregado foi o SIMPLE. Um esquema de discretização de segunda ordem foi utilizado na equação da pressão. O esquema “power-law” foi utilizado nas demais equações. O solver foi ajustado para que fosse realizada uma iteração entre a fase discreta e a fase contínua a cada 100 iterações. As propriedades no cálculo PDF foram ajustadas para que se atualizassem a cada 50 iterações. Como critério de convergência, a soma dos resíduos absolutos normalizados em cada volume de controle para todas as variáveis é controlada para serem menores que 10^{-4} , com exceção da energia que era assumido o valor menor que 10^{-6} . O solver foi ajustado para rodar com precisão simples nos cálculos.

8. RESULTADOS

Nesta parte do trabalho serão mostrados os resultados das simulações de combustão realizadas. Os campos de distribuição de temperaturas são mostrados em diversos planos. Os planos estão localizados da seguinte maneira: Os planos “a”, “b” e “c” são paralelos ao plano x-y e estão distantes (em Z) 0.1m, 0.5m e 1m da base da câmara, respectivamente. Já o plano “d” é paralelo ao plano y-z e está localizado na linha de centro da câmara.

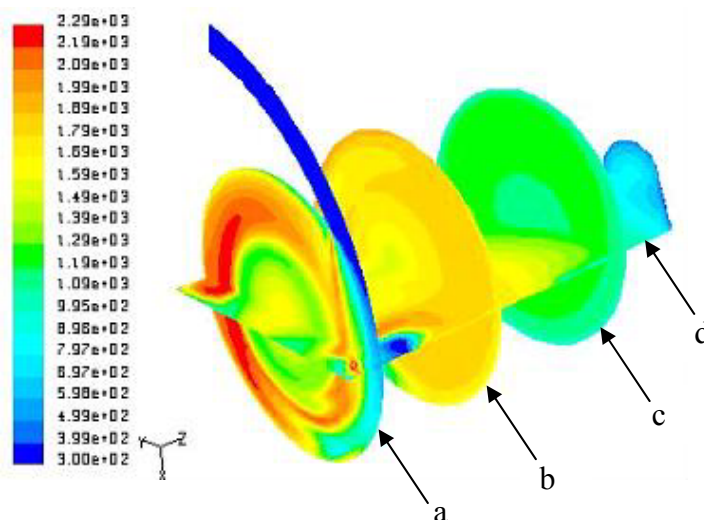


Figura 4. Distribuição de temperatura (K)

Na fig. 4 verifica-se que a combustão ocorre próxima a região de entrada de ar e carvão. Já quanto a distribuição de velocidades, na fig. 6 é mostrado que as velocidades mais elevadas se desenvolvem próximas meio da câmara. Outro fato que se constata é que o oxigênio que entra na câmara é consumido na região de entrada onde ocorre a combustão, como pode ser visto na fig. 7.

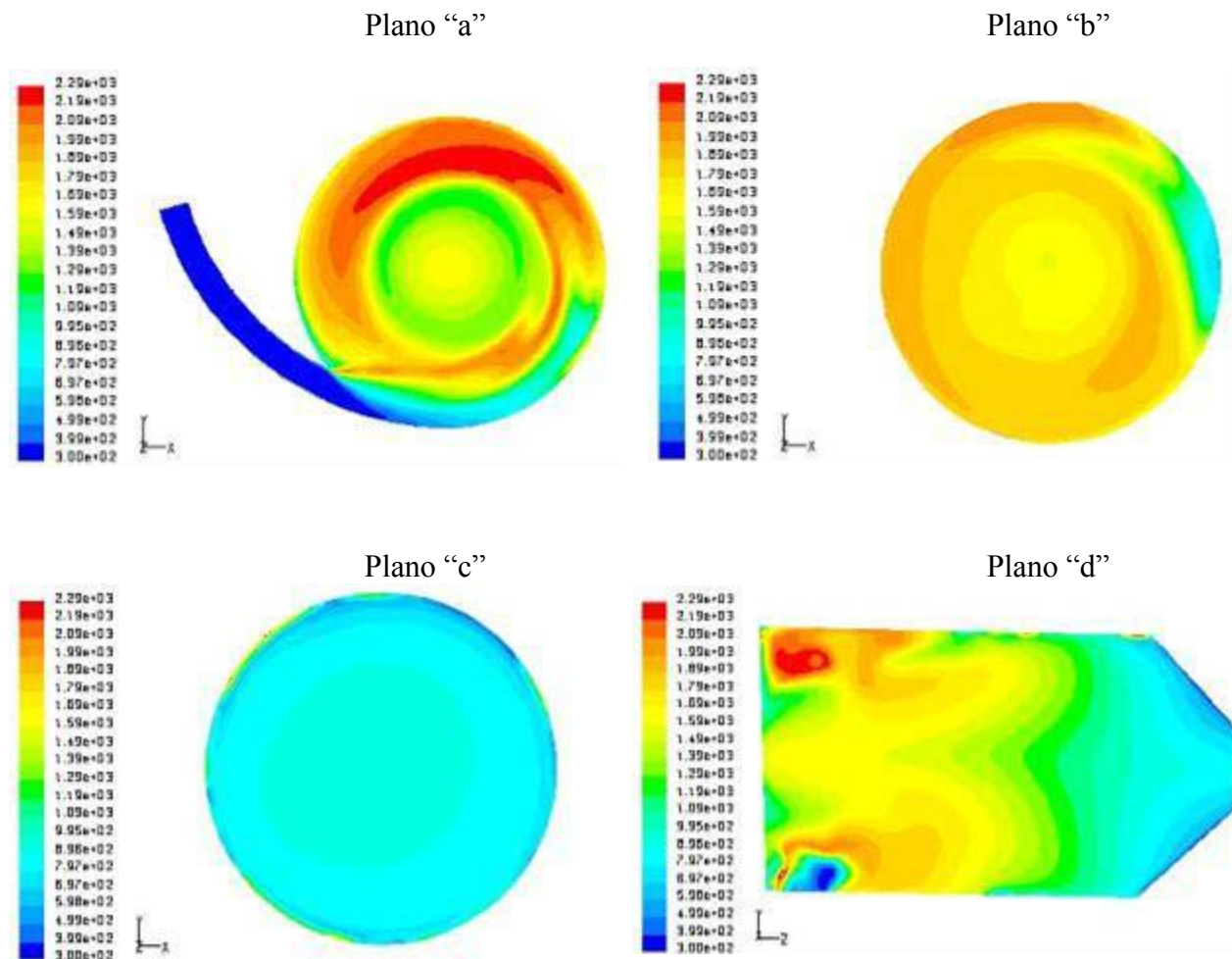


Figura 5. Planos "a", "b", "c" e "d" mostrados na fig. 4.

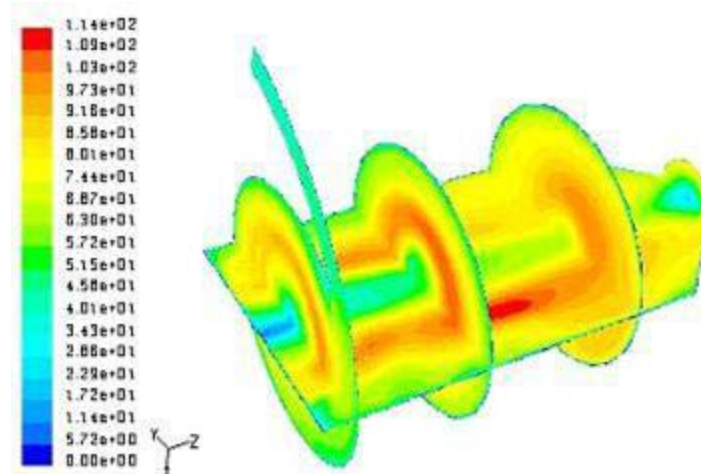


Figura 6. Distribuição de velocidade (m/s)

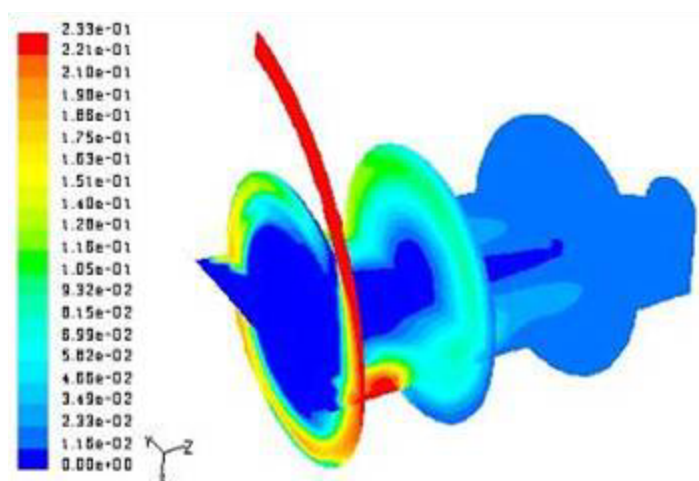


Figura 7. Distribuição de fração de massa de O_2

9. CONCLUSÕES

Foram realizadas simulações de combustão em um combustor ciclônico. A geometria do combustor foi gerada de forma que proporcionasse facilidades para a discretização do domínio. Procurou-se gerar uma malha leve do ponto de vista computacional, uma vez que os cálculos foram executados em um PC Pentium IV. Apesar do modelo apresentado não ser validado experimentalmente, os resultados qualitativos obtidos podem ajudar na compreensão dos fenômenos relacionados à combustão em uma câmara ciclônica. As figuras 4, 6 e 7 dão uma boa visão do fenômeno. Uma câmara de queima com a geometria descrita neste trabalho já está construída e está na fase instrumentação no Laboratório de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará. Com isso, num futuro próximo o modelo numérico apresentado poderá ser avaliado e, com certeza, melhorado.

10. REFERÊNCIAS

- Bockelie, M. J.; Eddings, E. G., Adams, B. R.; Valentine, J. R.; Cremer, M. A.; Smith, P. J.; Davis, K. A.; Heap, M. P., 1998, "Computational Simulations of Industrial Furnaces", International Symposium on Computational Technologies For Fluid/Thermal/Chemical Systems with Industrial Applications, San Diego, California, USA.
- Costa, V. J., 2002, "Modelo Matemático para a Combustão de Carvão Pulverizado e sua Interação com Água", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina;
- FLUENT Inc., 2003, "FLUENT 6.1, User's Guide", Volume, vol. 1-4, Lebanon, USA.
- Ha, J., Zhu, Z., 1998, "Computation of turbulent reactive flows in industrial burners", Applied Mathematical Modelling, vol. 22, pp.1059-1070
- Kobayashi, H., Howard, J. B. E Sarofin, A. F., 1976, "Coal devolatilization at high temperatures", Sixteenth Symposium (inter.) on Combustion/The Combustion Institute, pp. 411-425
- Orszag, S. A., Yakhot, V., Flannerry, W. S., Chouhury, D., Maruzewski, J., & Patel, B., 1993, "Renormalization group modeling and turbulence simulations", In: So, R.M.C., Speziale, C.G., & Launder, B.E.(eds), Near-wall turbulence flows. Elsevier Science Publisher
- Ragland, Kenneth W. and Borman, Gary L., 1998, "Combustion Engineering", McGraw-Hill, USA
- Strehler, A., 2000, "Technologies of wood combustion", Ecological Engineering, vol. 16, S25-S40
- Stopford, P. J., 2002, "Recent applications of CFD modelling in the power generation and combustion industries", Applied Mathematical Modelling, vol. 26, pp. 351-374
- Tillm, David A., 1991, "The combustion of solid fuels and waste", ACADEMIC PRESS, INC. San Diego, California

- Turns, S. R., 1996, "An introduction to combustion: concepts and applications", 1^a ed, McGraw-Hill, USA
- Veras, C. A. G., 1997, "Estudo Teórico dos Efeitos da Pressão e das Reações na Fase Gasosa na Queima de Combustíveis Sólidos Pulverizados", Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

SIMULATION OF THE PULVERIZED COAL COMBUSTION IN A CYCLONE COMBUSTOR

Fábio Alfaia da Cunha

alfaia@ufpa.br

Said Mounsif

smounsif@ufpa.br

Severiano da Silva Lima Filho

lima@ufpa.br

Marcio Ferreira Martins

marciofm@ufpa.br

Mechanical Engineering Department, Federal University of Pará, Augusto Corrêa Street, Guamá, Belém - PA - Brazil, P. O. Box 66075-110

Abstract. *The study of pulverized coal combustion is of addition importance, mainly because the perfect understanding of the processes involved in the combustion can provide the development of technologies that provide the reduction of the emission levels of pollutant for the atmosphere. In this work it is made the numeric simulation of the pulverized coal combustion in a cyclone combustor using the commercial code FLUENT. The use of a robust and reliable code is essential in this study type given the three-dimensional nature of the flow and reactions inside the cyclone combustor. For the simulation of the gaseous turbulent combustion was used the Presumed PDF combustion model, and the gas-phase turbulence was represented by the $k-\varepsilon$ RNG two equations model. Among some results that are shown it can be mentioned temperature and speed profiles in several selected plans.*

Keywords: *pulverized coal combustion, cyclone combustor, computational simulation, Presumed PDF combustion model*