

# SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA COMBUSTÃO DE CARVÃO PULVERIZADO UTILIZANDO O SOFTWARE COMERCIAL FLUENT

**Fábio Alfaia da Cunha**

[alfaia@ufpa.br](mailto:alfaia@ufpa.br)

**Said Mounsif**

[smounsif@ufpa.br](mailto:smounsif@ufpa.br)

**Severiano da Silva Lima Filho**

[lima@ufpa.br](mailto:lima@ufpa.br)

**Adriano Gomes Batista**

[agb@ufpa.br](mailto:agb@ufpa.br)

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

**Resumo.** Neste trabalho é simulada a combustão de carvão pulverizado considerando os principais fenômenos inerentes ao processo de combustão. O código comercial de dinâmica dos fluidos computacional FLUENT foi utilizado para a simulação numérica da combustão. A simulação é realizada em um combustor cilíndrico. Para representação do combustor foi utilizado um modelo 2D axisimétrico. No modelamento do escoamento reagente foi utilizado o modelo de combustão Non-Premixed. Este modelo admite que combustível e oxidante entrem na zona de reação em correntes distintas. A interação química-turbulência é modelada utilizando a função de densidade de probabilidade (PDF) Beta. A turbulência é modelada com modelo  $k-\epsilon$  Standard. Para a modelagem da combustão das partículas sólidas é utilizado o modelo Discrete Phase que dispõe de sub-modelos para preaquecimento, devolatização / evaporação e queima de char. Para cada um dos sub-modelos citados, existe um modelo transferência de calor associado. Na parte final deste trabalho, os resultados obtidos são discutidos e comparados com resultados disponíveis na literatura.

**Palavras-chave:** Combustão de carvão pulverizado, simulação computacional, modelo de combustão Non-premixed.

## 1. INTRODUÇÃO

Foi feito um esforço considerável no último século no sentido de se entender o complexo processo de combustão do carvão, principalmente porque o perfeito entendimento deste processo pode proporcionar o desenvolvimento de tecnologias que aumentem a eficiência de queima e proporcionem a redução dos níveis de emissão de poluentes para a atmosfera. A maior parte do conhecimento adquirido na área de combustão foi gerada mais precisamente nas últimas décadas onde surgiram modelos teóricos que descrevem com razoável precisão os fenômenos que ocorrem durante a combustão (Ragland et al. 1998). Esse avanço recente se deu por um lado pelo desenvolvimento de precisas técnicas experimentais e instrumentação, tal como a espectroscopia laser, que possibilitam medidas cada vez mais precisas, e por outro lado devido ao avanço

extraordinário dos computadores (Ragland et al. 1998), pois os modelos de combustão mais recentes estão alicerçados em modelos matemáticos, que dada a complexidade, só podem ser resolvidos numericamente. Na grande maioria dos casos os modelos desenvolvidos são unidimensionais e descrevem os processos que compõe a combustão para uma única partícula. Essa tendência é seguida por Veras (1997) que estudou a queima de partículas sólidas de forma teórica através da formulação de um modelo onde às equações da conservação da massa, do momento, de espécies e da energia são resolvidas numericamente.

Recentemente Costa (2002) desenvolveu um modelo matemático unidimensional para combustão que considera os principais fenômenos envolvidos na queima de partículas sólidas. As equações da conservação das espécies, da energia, do momento e da conservação da massa foram resolvidas numericamente. Em seu modelo está incorporado um mecanismo com 500 reações e 88 espécies e foi estabelecida sua influência no processo. O modelo considera influência da umidade contida nas partículas de carvão e a formação de poluentes. O modelo de devolatização utilizado, como no caso de Veras (1997) é o de Kobayashi et al. (1976). Os resultados encontrados são bastante consistentes com relação aos resultados experimentais e numéricos de outros trabalhos.

Para entendimento dos fenômenos físico-químicos os modelos unidimensionais, ou aqueles que consideram apenas uma partícula são ideais, pois traduzem de forma qualitativa e quantitativa o processo de combustão de forma bastante satisfatória. Porém, para um melhor entendimento dos fenômenos é necessário à modelagem bi e tridimensional, além disso, deve-se desenvolver modelos que levem em conta toda uma população de partículas e não apenas uma única.

Para a análise de um caso prático verifica-se na literatura (Stopford, 2002; Eaton, 1999; Thomas et al. 2002) que praticamente todos os autores recorrem ao uso de um código CFD comercial. Isso porque nestes códigos já estão incorporados modelos para resolução de problemas de escoamentos, transferência de calor e de massa e combustão, entre outros. Além de tudo isso, os códigos mais modernos possibilitam a inclusão de novos modelos.

Neste trabalho é utilizado um modelo axissimétrico bidimensional. O modelo de combustão utilizado é o Non-Premixed do FLUENT. Neste modelo são resolvidas equações de transporte para um ou dois escalares conservados (as frações de mistura e/ou sua variância). A química é modelada por um modelo de equilíbrio que assume que a química é rápida o suficiente para o equilíbrio químico existir ao nível molecular. A interação química-turbulência é modelada utilizando a função de densidade de probabilidade (PDF) Beta. O escoamento multifásico faz uso de uma função PDF para caracterizar a distribuição de partículas na fase contínua.

## **2. MODELAGEM DE COMBUSTÃO NA FASE GASOSA UTILIZANDO O MODELO NON-PREMIXED DO FLUENT.**

Sob certas hipóteses, a termoquímica pode ser reduzida a um só parâmetro: fração de mistura. A fração de mistura, denotada por  $f$ , é a fração de massa que se originou do fluxo de combustível. Em outras palavras, é a fração de massa local dos elementos do fluxo de combustível queimados e não queimados (C, H, etc.) em todas as espécies ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$   $\text{O}_2$ , etc.). Os elementos atômicos são conservados nas reações químicas. A combustão é simplificada para um problema de mistura, e as dificuldades associadas com as taxas de reação médias não-lineares são evitadas.

A aproximação de modelagem Non-premixed envolve a solução de equações de transporte para um ou dois escalares conservados (as frações de mistura). Equações para espécies individuais não são resolvidas. Ao invés, as concentrações de espécies são derivadas dos campos de fração de mistura preditos. No caso do FLUENT, os cálculos termoquímicos são pré-processados no prePDF e tabelados para posterior acesso do FLUENT. A interação de turbulência e química é calculada por uma função de densidade de probabilidade (probability density function, PDF). O modelo Non-premixed permite a predição de espécies intermediárias (radical), efeitos de dissociação, e acoplamento turbulento – químico rigoroso. O método é computacionalmente eficiente devido ao fato de não requerer a solução de um número grande de equações de transporte de espécies.

O modelo Non-premixed requer que o escoamento seja turbulento. O sistema reagente deve incluir um fluxo de combustível, um fluxo de oxidantes e, opcionalmente, um fluxo secundário (um outro fluxo de oxidante ou combustível, ou um fluxo não reagente). Finalmente, a cinética química deve ser rápida de modo que o escoamento esteja perto do equilíbrio químico.

### 3. MODELOS MATEMÁTICOS

#### 3.1 Modelo da Fração de Mistura

A base da aproximação de modelagem Non-premixed está de modo que, sob um certo conjunto de hipóteses simplificadoras, o estado termoquímico instantâneo do fluido esteja relacionado a uma quantidade escalar conservada conhecida como fração de mistura  $f$ . A fração de mistura pode ser escrita em termos de fração de massa atômica como:

$$f = \frac{Z_i - Z_{i,ox}}{Z_{i,fuel} - Z_{i,ox}} \quad (1)$$

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. 1 é idêntica para todos os elementos, e a definição de fração de mistura é única.

##### 3.1.1 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 (time-averaged) é:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{f}) + \nabla \cdot (\rho\bar{v}\bar{f}) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f} \right) + S_m \quad (2)$$

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, o FLUENT resolve uma equação conservativa para a variância (*variance*) de fração de mistura,  $\bar{f}'^2$ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\bar{f}'^2) + \nabla \cdot (\rho\bar{v}\bar{f}'^2) = \nabla \cdot \left( \frac{\mu_t}{\sigma_t} \nabla \bar{f}'^2 \right) + C_g \mu_t (\nabla^2 \bar{f}) - C_d \rho \frac{\varepsilon}{\kappa} \bar{f}'^2 \quad (3)$$

Onde  $f' = f - \bar{f}$ . As constantes  $\sigma_t$ ,  $C_g$  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 em 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 turbulência-química.

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:

$$p(f)\Delta f = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_i \tau_i \quad (4)$$

onde  $\tau_i$  é a fração de tempo que  $f$  gasta na banda  $\Delta f$ . 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, pode ser usado como a função ponderada para calcular os valores médios no tempo de concentrações de espécies, densidade e temperatura usando a equação integral como segue:

$$\bar{\phi}_i = \int_0^t p(f) \phi_i(f) df \quad (5)$$

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

$$p(f) = \frac{f^{\alpha-1}(1-f)^{\beta-1}}{\int f^{\alpha-1}(1-f)^{\beta-1} df} \quad (6)$$

Onde:

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

### 3.2 Equação da continuidade

Para geometrias axissimétricas, a equação da continuidade é dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r} (\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = 0 \quad (7)$$

Onde  $x$  é a coordenada axial,  $r$  é a coordenada radial,  $v_x$  é a velocidade axial e  $v_r$  é a velocidade radial.

### 3.3 Equação da Conservação da Quantidade de Movimento

Para geometrias axissimétricas 2D, as equações da conservação da quantidade de movimento nas direções axial e radial são dadas por:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (r \rho v_x v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r v_x) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[ r \mu \left( 2 \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu \left( \frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) \right] \quad (8)$$

e

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (r \rho v_x v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r v_r) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[ r \mu \left( \frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \mu \left( 2 \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] - 2 \mu \frac{v_r}{r^2} + \frac{2}{3} \frac{\mu}{r} (\nabla \cdot \vec{v}) \quad (9)$$

Onde,

$$\nabla \cdot \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r}$$

### 3.4 Modelo de Turbulência

Para o fechamento das equações foi utilizado o modelo de turbulência k- $\epsilon$  Standard com seus valores de constantes padrões.

### 3.5 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.

#### 3.5.1 Devolatização

O modelo de devolatização 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 devolatização cinética na forma proposta por Kobayashi 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 devolatização sobre diferentes faixas de temperatura. As duas taxas cinéticas são empregadas na expressão de devolatização como segue:

$$\frac{m_v(t)}{(1-f_{w,0})m_{p,0} - m_a} = \int_0^t (\alpha_1 \mathfrak{R}_1 + \alpha_2 \mathfrak{R}_2) \exp\left(-\int_0^t (\mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_2) dt\right) dt \quad (10)$$

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,  $\alpha_1, \alpha_2$  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  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  adotados são 0,4 e 0,8 respectivamente. O diâmetro da partícula de carvão aumenta durante a devolatização de acordo com o coeficiente aumento (swelling),  $C_{sw}$ , que para o cálculo foi assumido igual a 2.

#### 3.5.2 Reação heterogênea de superfície (Combustão do Carbono fixo)

Após a devolatização 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 contabilizadas pelo **Modelo de Taxa Cinética/Difusiva Limitada** que assumi que a taxa de reação de superfície é determina tanto pela taxa cinética (eq. 11) quanto pela difusiva (eq. 12). A taxa de combustão de combustão é dada na eq. (13)

$$\mathfrak{R} = C_2 e^{-(E/RT_p)} \quad (11)$$

$$D_0 = C_1 \frac{[(T_p + T_\infty)/2]^{0.75}}{d_p} \quad (12)$$

$$\frac{dm_p}{dt} = -A_p p_{ox} \frac{D_0 \mathfrak{R}}{D_0 + \mathfrak{R}} \quad (13)$$

Onde  $A_p$  é a área superficial partícula ( $\pi d_p^2$ ),  $p_{ox}$  é a pressão parcial da espécie oxidante no gas 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. PROPRIEDADES, COMPOSIÇÕES E CONDIÇÕES DE CONTORNO.

Para o desenvolvimento desta parte do trabalho são dados os parâmetros utilizados nos cálculos bem como as condições de contorno adotadas. É considerado um modelo bi-dimensional axisimétrico. 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:  $H_2O$ ,  $H_2$ ,  $OH$ ,  $H$ ,  $O$ ,  $O_2$ ,  $N$ ,  $C(s)$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_6H_6$ ,  $N_2$ .

A geometria do combustor é basicamente um cilindro que pode ser representado para o caso axisimétrico por um retângulo com altura e largura que correspondem respectivamente ao raio e comprimento de um cilindro. As paredes do combustor são consideradas isotérmicas e assumem o valor de 800K. É aplicado um perfil de velocidade desenvolvido na entrada do canal cuja velocidade média correspondente é de 3m/s. Na saída do canal é considerado um perfil constante de pressão. A temperatura inicial do ar que entra no combustor é de 1073K e a do carvão de 300K. A injeção de carvão é considerada uniforme sobre a aresta de entrada de ar. O diâmetro da partícula de carvão é de 100 $\mu m$ . A vazão mássica de carvão é de 0,008kg/s e a de ar de 0,1117kg/s. Na malhagem foram utilizados diferentes tamanhos de elementos. No primeiro quarto do combustor foi utilizado um elemento que na direção axial era quatro vezes menor que os elementos utilizados na malhagem dos três quartos restantes.

#### 5. SOLUÇÃO NUMÉRICA

As simulações numéricas foram executadas no código de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) Fluente. As equações governantes são resolvidas utilizando o método de volumes finitos em um sistema de malhas não-estruturadas. O algoritmo empregado foi o SIMPLEC. Um esquema de discretização de segunda ordem foi utilizado na equação da pressão. Nas demais equações foi utilizado o esquema power-law. Esse procedimento reduz os efeitos de difusão numérica na solução e foi o que apresentou maior custo benefício. O solver foi ajustado para que fosse realizada uma iteração entre a fase discreta e a fase contínua a cada 50 iterações. As propriedades do pdf foram ajustadas para que se atualizassem a cada 25 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 dupla nos cálculos.

#### 6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta parte do trabalho serão mostrados e discutidos os resultados das simulações de combustão realizadas. Inicialmente são mostrados resultados de três cálculos com diferentes malhas, malha 1 com 10400 volumes, malha 2 com 21640 volumes e malha 3 com 42400 volumes. O resultados comparados são os de temperaturas do gás em três posições distintas. As posições são,

respectivamente,  $R=0$ ,  $0.33R$  e  $0.66R$ , onde  $R$  representa o raio do combustor. Fixados os raios citados são extraídos perfis de temperaturas em função do comprimento do combustor de cada caso simulado. A fig. 1 mostra os resultados para as três malhas.

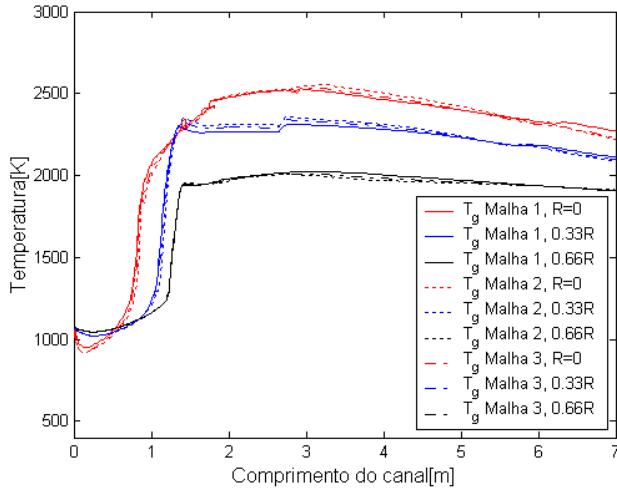


Figura 1. Evolução da temperatura do gás em função do comprimento do combustor.

Nota-se que os resultados não mudam significativamente com o refinamento da malha, mesmo a malha 1 dá bons resultados de modo que não haveria necessidade do uso de malhas finas. A comparação dos resultados entre diferentes malhas (malhas mais refinadas), dá segurança quanto ao uso de uma malha adequada.

A seguir serão mostrados dois resultados que são comparados com os resultados do trabalho numérico desenvolvido por Costa (2002) com o objetivo de se avaliar os resultados do presente trabalho. Mais adiante são mostrados e discutidos outros resultados obtidos.

São apresentados, na fig. 2(a), três perfis de temperatura para uma partícula. Os perfis são extraídos no centro, a  $0.31R$  e a  $0.63R$  em função do comprimento do combustor, onde  $R$  é o raio do combustor. Verifica-se que as tendências de decrescimento e crescimento de temperatura estão de acordo com os resultados do trabalho de Costa (2002). As diferenças dos resultados encontradas são ocasionadas principalmente devido às diferenças dos modelos. O modelo de Costa (2002) é unidimensional enquanto que o modelo do presente trabalho é 2D axissimétrico. Nota-se nas fig. 2(a) e (b) que os perfis de temperatura tirados próximo do centro do combustor se aproximam mais dos resultados de Costa (2002). O que mostra a influência da parede do combustor no processo de combustão. Comparando as curvas de temperatura para  $R=0$ ,  $0.31R$  e  $0.63R$ , conclui-se que, como esperado, os gradientes de temperatura são muito maiores na direção axial do que na radial.

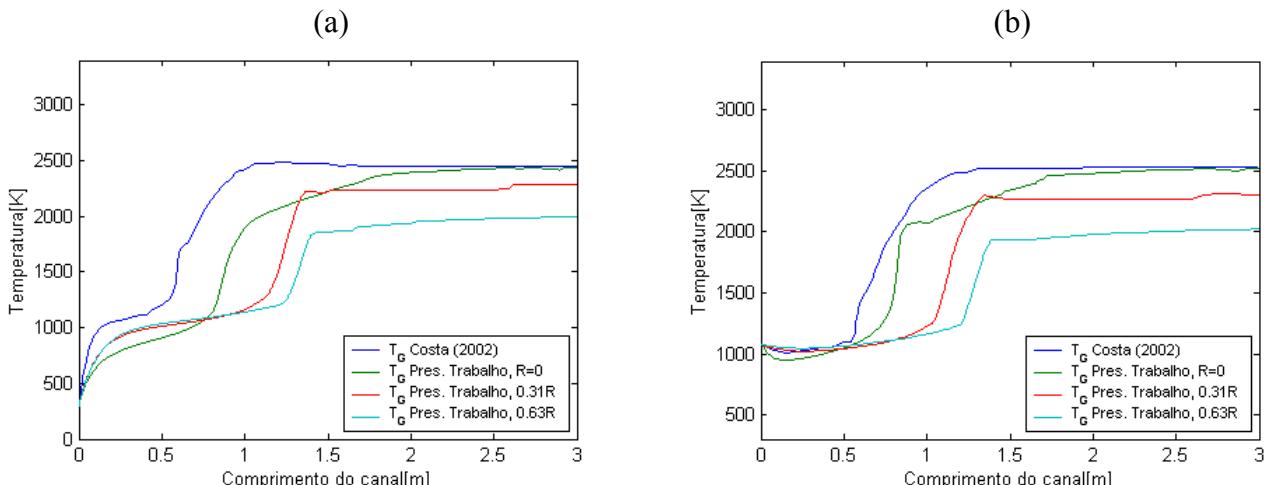


Figura 02. Perfil de temperatura de uma partícula em função do comprimento do combustor (a),  
Evolução da temperatura do gás em função do comprimento do combustor (b)

Os perfis de temperatura para  $R=0$  das fig. 2(a) e (b) apresentam temperaturas máximas muito próximas das do trabalho de referência

Na fig. 2(b) é mostrado o gráfico da evolução da temperatura dos gases em função do comprimento do combustor. Os resultados do campo de temperatura são selecionados nas mesmas posições do caso anterior. Para este caso, os resultados obtidos também se mostram bastante consistentes em relação aos resultados de Costa (2002). As diferenças verificadas se devem pelos mesmos motivos do caso anterior.

Uma vez que já foram conseguidos bons resultados com relação aos resultados de Costa (2002) pode-se concluir que as previsões de outros resultados também serão satisfatórias.

Serão apresentados a partir desta parte os resultados bidimensionais. O cálculo de combustão é realizado apenas em um setor do combustor, mas devido a um recurso de espelhamento o FLUENT apresenta o combustor completo para todos os resultados gráficos. Nos resultados seguintes os valores das propriedades calculadas são dados em escalas de cores.

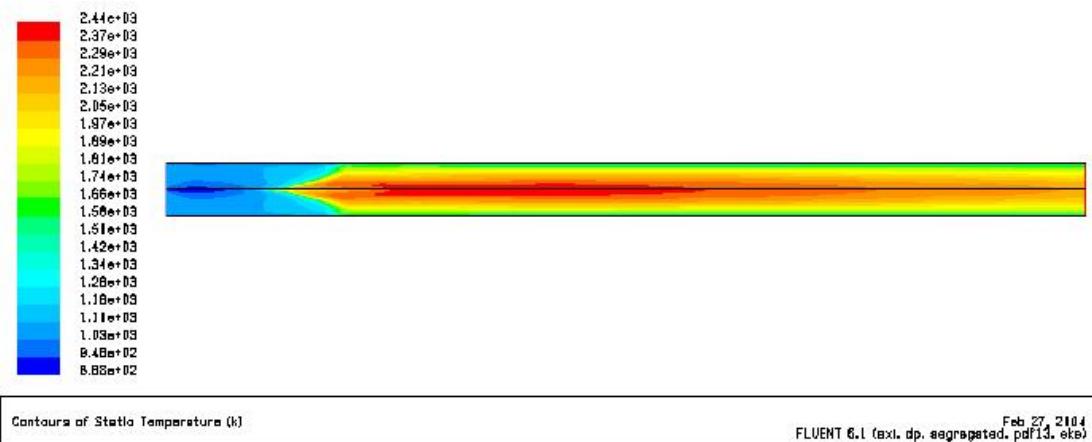


Figura 03. Distribuição de temperatura

Nas fig. 3 e 4 são mostrados os contornos de temperatura e velocidade, respectivamente, no combustor. Pode-se notar nas figuras que existe uma zona de fortes gradientes de velocidade e temperatura localizadas no início do canal. Isso acontece porque esta é a zona onde estão se processando as reações de combustão como será mostrado nas figuras 5 e 6.

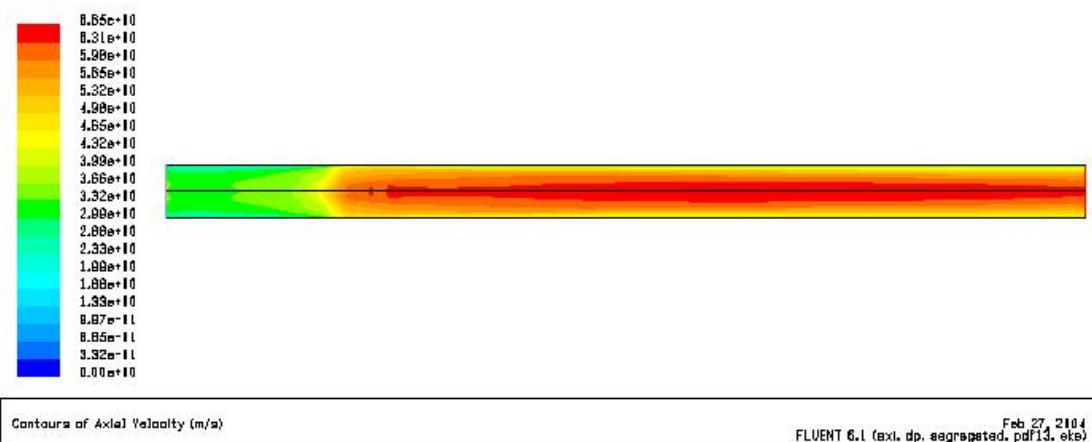


Figura 04. Distribuição de velocidade

Nas fig. 5 e 6 são mostrados os estágio de queima e devolatização de carvão no interior do combustor.

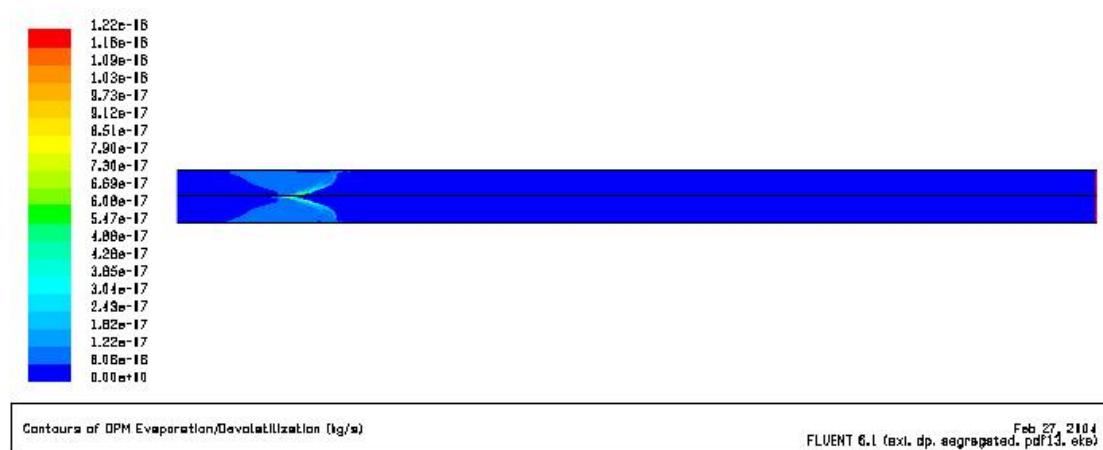


Figura 05. Taxa de Devolatização

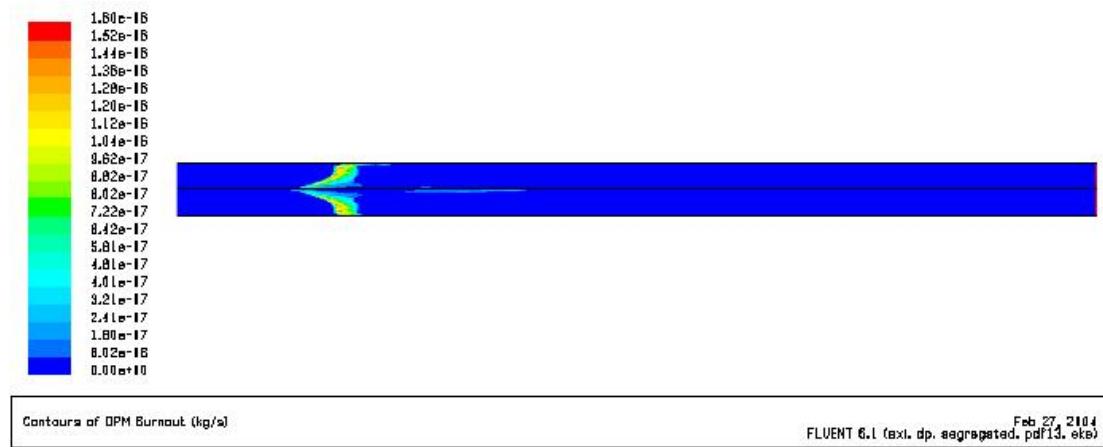


Figura 06. Taxa de Queima de Char (kg/s)

## 6. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram realizadas simulações de combustão que, de um modo geral, se mostraram bastantes consistentes, pois foram obtidos resultados que mostraram boa concordância com resultados de outro autor. Dentre os resultados, pôde ser verificada a influência das paredes do combustor no campo de temperaturas. Os bons resultados encontrados nas simulações são principalmente devido ao uso do código comercial FLUENT que dá uma excelente base para o desenvolvimento deste tipo de análise. As maiores dificuldades encontradas foram quanto à densidade de malha e convergência dos resultados. Essas dificuldades foram contornadas à medida que o trabalho foi se desenvolvendo. Apesar das dificuldades inerentes aos cálculos, os resultados de uma análise CFD falam por si só, pois através de uma breve inspeção deles, dos resultados, pode-se chegar a importantes conclusões a respeito dos fenômenos analisados.

## 7. REFERÊNCIAS

- Eaton, A.M.; Smoot, L.D.; Hill, S.C.; Eatough, C.N., 1999, “Components, formulations, solutions, evaluation, and application of comprehensive combustion models”, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 25, pp. 387–436.
- 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 1-4, Lebanon, USA.
- Göerner, K., July 2003, “Waste Incineration”, IFRF Combustion Journal, Article Number 200303, ISSN 1562-479X.
- Stopford, P. J., 2002, “Recent applications of CFD modelling in the power generation and combustion industries”, Applied Mathematical Modelling, Vol. 26, pp. 351–374.
- Ragland, K. W. and Borman, G. L., 1998, “Combustion Engineering”. McGraw-Hill, USA.
- 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<sup>a</sup> 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.

## COMPUTATIONAL SIMULATION OF THE PULVERIZED COAL COMBUSTION USING THE COMMERCIAL SOFTWARE FLUENT

**Fábio Alfaia da Cunha**  
[alfaia@ufpa.br](mailto:alfaia@ufpa.br)

**Said Mounsif**  
[smounsif@ufpa.br](mailto:smounsif@ufpa.br)

**Severiano da Silva Lima Filho**  
[lima@ufpa.br](mailto:lima@ufpa.br)

**Adriano Gomes Batista**  
[agb@ufpa.br](mailto:agb@ufpa.br)

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

**Abstract.** In this work the pulverized coal combustion is simulated considering the main inherent phenomena to the combustion process. The commercial CFD code FLUENT was used for the computational simulation. The simulation is accomplished in a cylindrical combustor. A 2D axisymmetric geometry was used. In the modeling of the reacting flow the Non-Premixed combustion model was used. In this model fuel and oxidizer enter the reaction zone in distinct streams. Interaction of turbulence and chemistry is accounted for with the Beta probability density function (PDF). The turbulence was modeled with the Standard  $k$ -epsilon model. For the combustion modelling of the solid particles it is used the Discrete Phase Model that it has sub-models for pre-heating, devolatilization / evaporation and it burns of char. For each one of the mentioned sub-models, an associated heat transfer model exists. In the final part of this work, the obtained results are discussed and compared with available results in the literature.

**Keywords:** Pulverized coal combustion, computational simulation, Non-Premixed combustion model