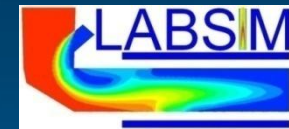


Departamento de Engenharia e Ciência da Computação  
Curso de Engenharia Mecânica



**URI**  
**CAMPUS DE**  
**ERECHIM**



**CFD ANALYSIS OF THE PULVERIZED COAL COMBUSTION IN A  
BOILER USING DIFFERENT BRAZILIAN MANUFACTURED  
COALS:**

**CE3100 AND CE4500**

**Ac. Luís Carlos Lazzari**

**luislazzari@yahoo.com.br**

Departamento de Engenharia e Ciência da Computação  
Curso de Engenharia Mecânica

# Equipe do Projeto Rede Carvão

- Cristiano Vitorino da Silva, [cristiano@uricer.edu.br](mailto:cristiano@uricer.edu.br)
- Aline Ziemniczak, [aline.zz@hotmail.com](mailto:aline.zz@hotmail.com)
- Anderson José Antoniatti, [anderniatti@yahoo.com.br](mailto:anderniatti@yahoo.com.br)
- Arthur Bortolin Beskow, [arthur@uricer.edu.br](mailto:arthur@uricer.edu.br)
- Rômulo Renan Serafin, [romulo\\_serafin@hotmail.com](mailto:romulo_serafin@hotmail.com)
- Univ. Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI. Av. Sete de Setembro, 1621, 99700-000, Erechim, RS – Brasil.
- 
- Maria Luiza Sperb Indrusiak, [sperbindrusiak@via-rs.net](mailto:sperbindrusiak@via-rs.net)
- Univ. do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS. Av. Unisinos, n. 950, CEP 93022-000, São Leopoldo – RS – Brasil.
- 
- Paulo Smith Schneider, [pss@mecanica.ufrgs.br](mailto:pss@mecanica.ufrgs.br)
- Univ. Federal do Rio Gande do Sul – UFRGS. Rua Sarmento Leite, n.425, CEP 90050-170, Porto Alegre – RS – Brasil.

# Introdução

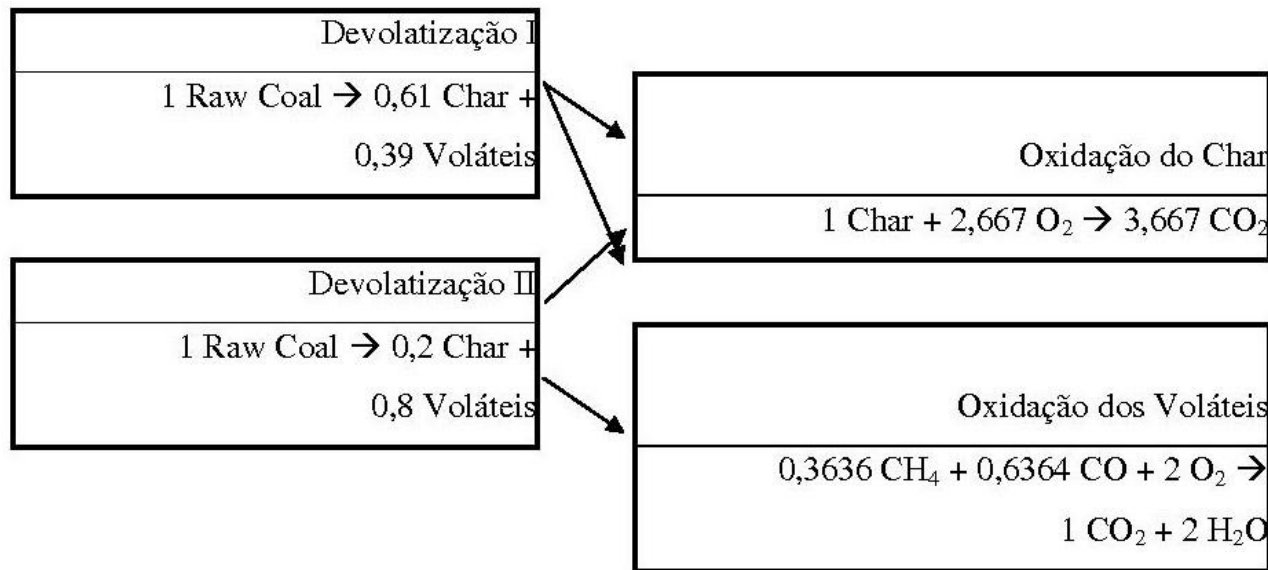
- O carvão mineral é o combustível mais utilizado no mundo como fonte de energia devido à sua disponibilidade;
- Existem diversos tipos de carvões com qualidades diferentes, principalmente em relação a sua composição química. A escolha equivocada do tipo de carvão acarreta em desperdício, diminuição do rendimento da instalação e emissão acentuada de poluentes para a atmosfera;
- Por isso, é importante conhecer o processo de combustão a fim de se fazer a melhor escolha dos parâmetros de operação para o gerador de vapor em relação ao combustível que será utilizado no equipamento.

# Objetivos

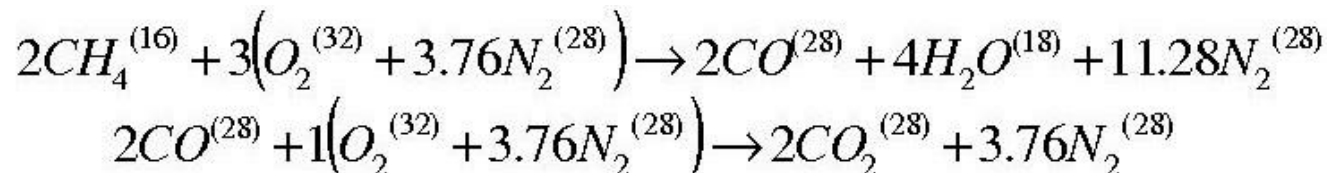
- Modelar numericamente o processo de combustão que ocorre no interior de uma caldeira de um grande complexo termoelétrico;
- Obter dados relativos ao processo de queima do combustível para melhor compreensão do processo;
- Realizar análises com diferentes carvões minerais brasileiros de diferentes composições, o tipo CE3100 e o tipo CE4500;
- Identificar possíveis problemas de operação na caldeira em estudo;
- Avaliar qual dos carvões testados apresenta melhores resultados em relação ao processo de combustão e ao desempenho do gerador de vapor.

# Modelagem Matemática

Considera-se que o processo de combustão ocorra em taxas finitas, assumindo que a devolatização do carvão ocorra em duas etapas produzindo  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}$ :



Para a oxidação do metano considera-se duas etapas globais :



Uma modelagem Lagrangiana/Euleriana é usada para modelar o escoamento de partículas de carvão e gases, considerando-se o regime permanente.

As equações médias de Reynolds são utilizadas para a solução do escoamento reativo, assumindo o modelo  $k-\omega$  para representar a turbulência do escoamento.

### Conservação de massa

$$\frac{\partial \tilde{\rho}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\tilde{\rho}_i \tilde{U}_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho}_i (\tilde{U}_{ij} - \tilde{U}_j) - \bar{\rho}_i "U_j") + S_i$$

onde  $\tilde{U}_j = \Sigma (\tilde{\rho}_i \tilde{U}_{ij}) / \bar{\rho}$

### Conservação de espécies químicas

$$\frac{\partial \tilde{\rho}_i \tilde{Y}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{U}_j \tilde{Y}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \bar{\rho} D_i + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial \tilde{Y}_i}{\partial x_j} \right) + \bar{R}_\alpha$$

onde a formação ou destruição de espécies químicas é

$$\bar{R}_\alpha = \sum_k \bar{R}_{\alpha,k} \quad \text{e} \quad \bar{R}_{\alpha,k,Chemical} = -\eta_{\alpha,k} \bar{M} \bar{M}_\alpha \tilde{T}^{\beta_k} A_k \Pi_\alpha \tilde{C}_\alpha^{\gamma_{\alpha,k}} \exp\left(\frac{-E_k}{\bar{R} \tilde{T}}\right) \quad \text{pelo modelo de Arrhenius.}$$

A partir do modelo de Eddy-Breakup

$$\bar{R}_{\alpha,k,EBU} = -\eta_{\alpha,k} \bar{M} \bar{M}_\alpha A \bar{\rho} \frac{\varepsilon}{k} \frac{\tilde{Y}_\alpha}{\eta_{\alpha,k} \bar{M}_\alpha} \quad \text{ou} \quad \bar{R}_{\alpha,k,Premixing} = \eta_{\alpha,k} \bar{M} \bar{M}_\alpha A B \bar{\rho} \frac{\varepsilon}{k} \frac{\Sigma_p \tilde{Y}_p}{\Sigma_p \eta_{p,k} \bar{M}_p}$$

$$\bar{R}_{\alpha,k} = \min (\bar{R}_{\alpha,k,Chemical}, \bar{R}_{\alpha,k,EBU}, \bar{R}_{\alpha,k,Premixing})$$

## Conservação de quantidade de movimento

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{U}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\tilde{U}_i\tilde{U}_j) = -\frac{\partial p'}{\partial x_j}\delta + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu_{eff}\frac{\partial \tilde{U}_i}{\partial x_j}\right) + \frac{\partial \tilde{U}}{\partial x_j\partial x_i} + S_u \quad \text{onde} \quad \mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad \text{e} \quad p' = \bar{p} - (2/3)k$$

## Conservação de energia (Le=1)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{h}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\tilde{U}_j\tilde{h}) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\frac{k}{c_p}\right)\frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_j} + \sum_i^{Nc} \bar{\rho}D_i\tilde{h}_i\frac{\partial \tilde{Y}_i}{\partial x_j} + \frac{\mu_t}{Pr_t}\frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_j}\right) + \overline{S_{rad}} + \overline{S_{rea}} \quad \text{onde} \quad c_p = \sum_{\alpha} \tilde{Y}_{\alpha}c_{p,\alpha}$$

e o termo fonte de radiação térmica, descrito pelo modelo *Discrete Transfer Radiation Model* (DTRM), é

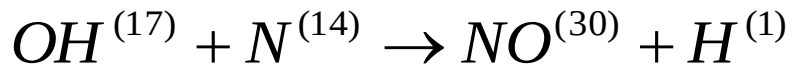
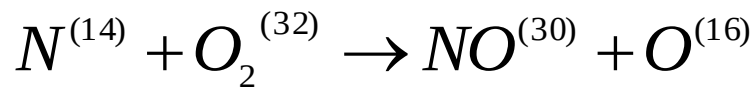
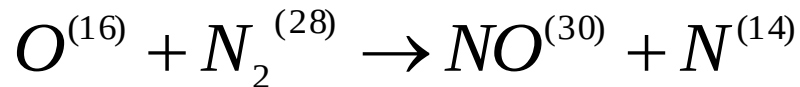
$$\frac{dI(r,s)}{dS} = \frac{K_a\sigma\tilde{T}^4}{\pi} - K_a I(r,s) + S''$$

Sendo que o termo fonte de reações químicas é modelado por

$$\bar{S}_{rea} = \sum_{\alpha} \left[ \frac{h_{\alpha}^0}{MM_{\alpha}} + \int_{\tilde{T}_{ref,\alpha}}^{\tilde{T}} c_{p,\alpha} d\tilde{T} \right] \bar{R}_{\alpha}$$

## Formação de poluentes - NO<sub>x</sub>

A formação de NO<sub>x</sub> modelada através do mecanismo *thermal-NO* é composta de três etapas de reações químicas conforme segue



Sendo que as taxas de reação química são previstas pela equação de Arrhenius.

O mecanismo de Fenimore, *NO<sub>x</sub>-Prompt*, é modelado para temperaturas inferiores a 1800 K onde os radicais podem reagir rapidamente com o nitrogênio molecular para formar o HCN que pode ser oxidado com o NO, em condições de chama. De Soete propôs uma taxa única reação para descrever a fonte de NO pelo mecanismo de Fenimore, que é usado neste trabalho, e os modelos combinados Eddy Breakup - Arrhenius são utilizados para prever essa taxa de reação química.

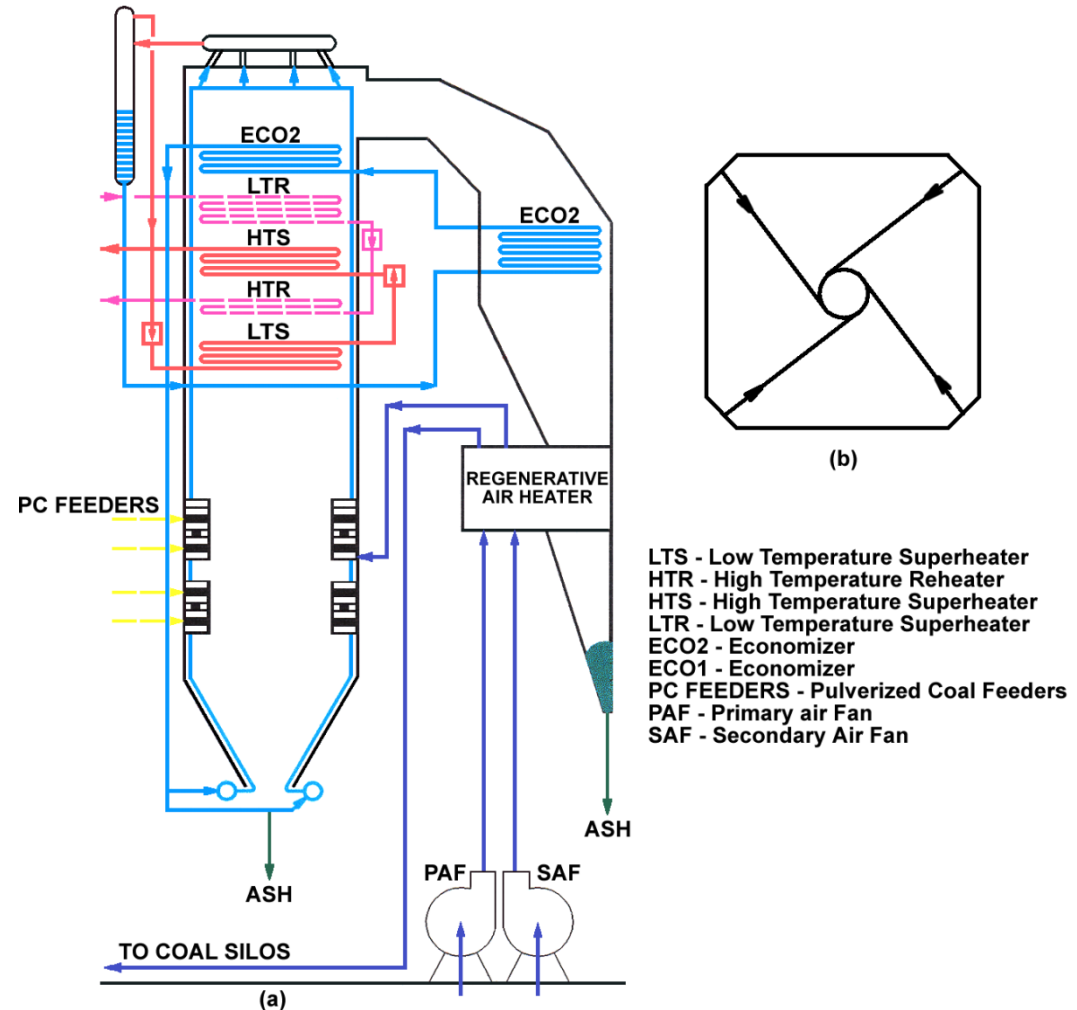
# Modelo físico



# Modelo físico

## Central Termelétrica de 160 MWe

A caldeira do gerador de vapor possui oito queimadores tangenciais em dois níveis com quatro unidades.



## Condições de contorno

- Tipo de carvão – Beneficiado CE3100;
- Entrada de carvão – 50 kg/s a 270 °C;
- Entrada de ar primário – 79,5 kg/s a 270 °C;
- Entrada de ar secundário – 100 kg/s a 330 °C;
- Pressão na saída – -400 Pa (Depressão em função do ventilador);
- Temperatura prescrita nas paredes dos trocadores de calor – 400 °C;
- Temperatura nas paredes da câmara de combustão – Função entre a altura da câmara e a temperatura;
- Superaquecedores – Modelados como matriz porosa.

## Condições de contorno

- Tipo de carvão – Beneficiado CE4500;
- Entrada de carvão – 27,19 kg/s a 270 °C;
- Entrada de ar primário – 36,15 kg/s a 270 °C;
- Entrada de ar secundário – 85,15 kg/s a 330 °C;
- Pressão na saída – -400 Pa (Depressão em função do ventilador);
- Temperatura prescrita nas paredes dos trocadores de calor – 400 °C;
- Temperatura nas paredes da câmara de combustão – Função entre a altura da câmara e a temperatura;
- Superaquecedores – Modelados como matriz porosa.

# Condições de contorno

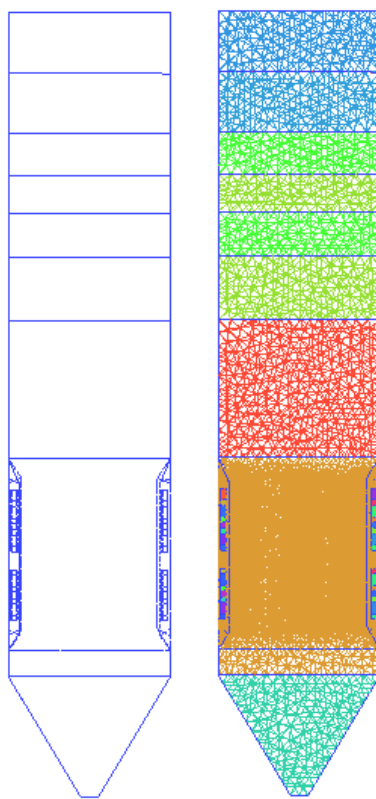
| Espécies Químicas | Carvão beneficiado<br>CE3100 |                | Carvão beneficiado<br>CE4500 |                |
|-------------------|------------------------------|----------------|------------------------------|----------------|
|                   | Base seca                    | Base úmida     | Base seca                    | Base úmida     |
| Carbono           | 33,21 %                      | 27,74 %        | 45,20 %                      | 37,75 %        |
| <b>Cinzas</b>     | <b>54,78 %</b>               | <b>45,76 %</b> | <b>40,48 %</b>               | <b>33,81 %</b> |
| Oxigênio          | 7,92 %                       | 6,62 %         | 7,47 %                       | 6,24 %         |
| Hidrogênio        | 2,34 %                       | 1,95 %         | 3,78 %                       | 3,16 %         |
| Enxofre           | 1,14 %                       | 0,95 %         | 2,18 %                       | 1,83 %         |
| Nitrogênio        | 0,61 %                       | 0,51 %         | 0,89 %                       | 0,74 %         |
| Umidade           | 0,00 %                       | 16,47 %        | 0,00 %                       | 16,47 %        |

## Método numérico

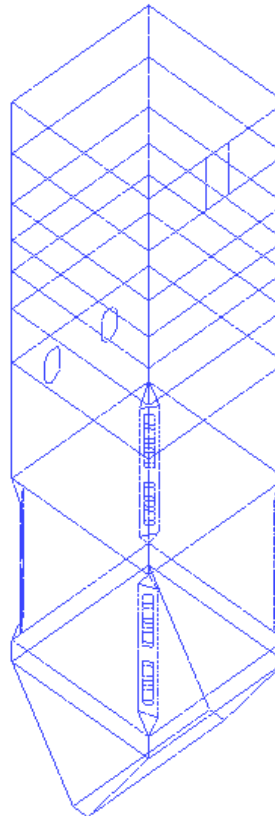
- Método dos Volumes Finitos desenvolvido por Patankar utilizando o software Ansys CFX v.11;
- Devido a não linearidade e alto acoplamento entre as propriedades subrelaxações são usadas com valores de 0,1 para a conservação de energia, massa, quantidade de movimento, espécies químicas, fontes dessas equações e de 0,01 para as reações das partículas de carvão;
- Tempo físico para a solução da formulação é de cerca de 20 dias, utilizando computadores com processadores Core 2 Quad, com 16 Gb de RAM;
- Critério de convergência RMS - *Root Mean Square* na ordem de  $10^{-6}$ .

# Malha computacional

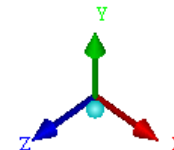
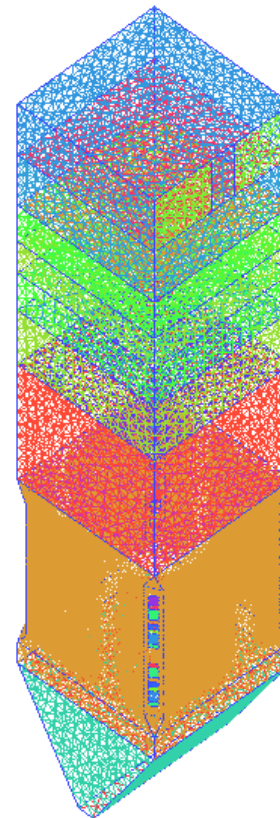
Malha constituída por aproximadamente 1.500.000 elementos divididos entre tetraédricos no interior e prismáticos nas paredes.



(a)

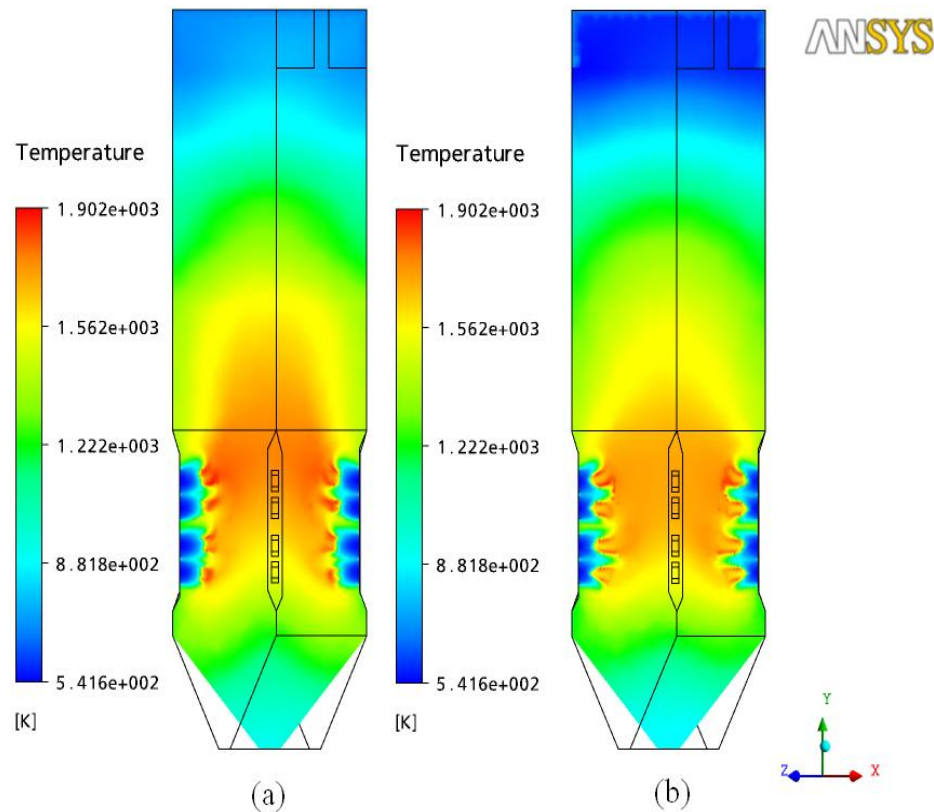


(b)



# Resultados

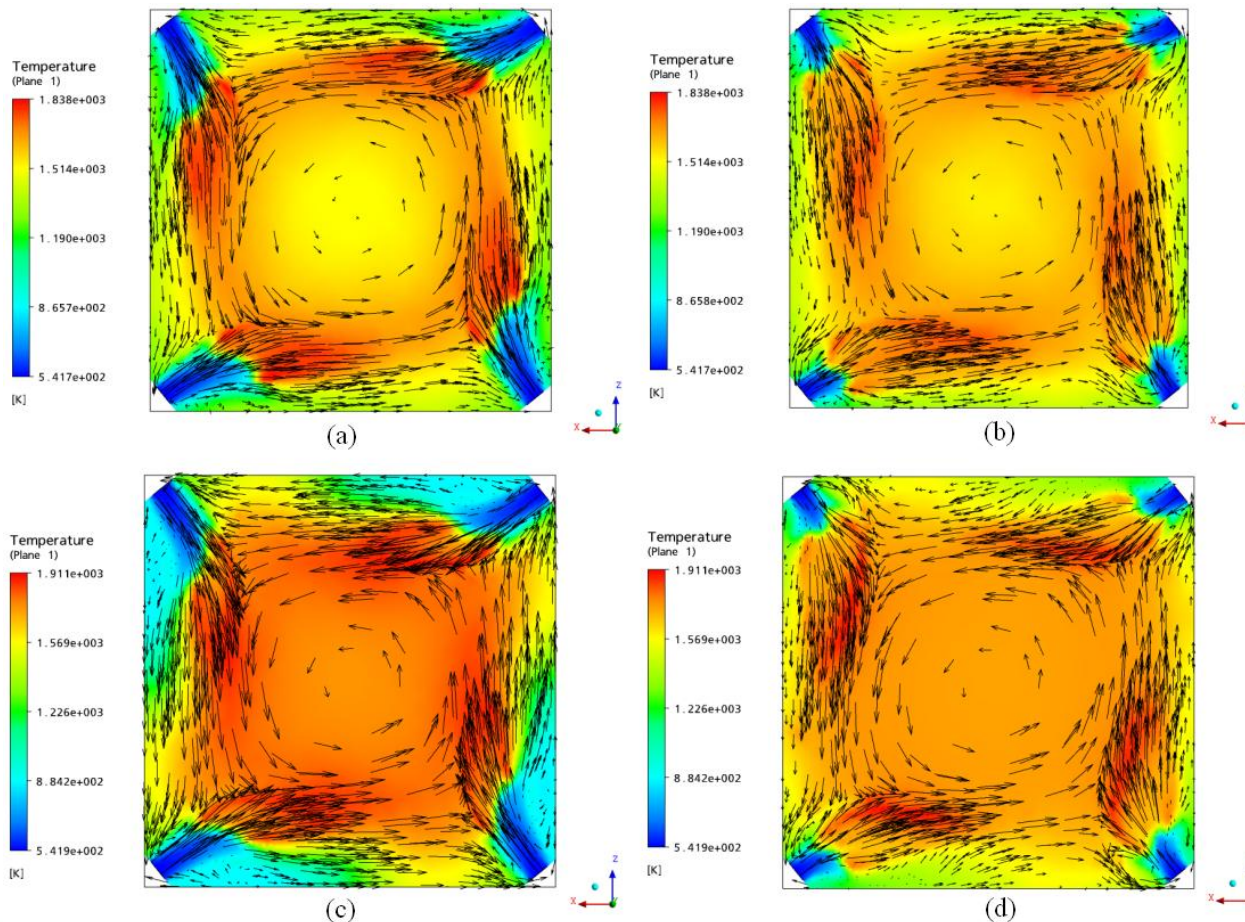
Campo de temperaturas: (a) CE3100; (b) CE4500.



# Resultados

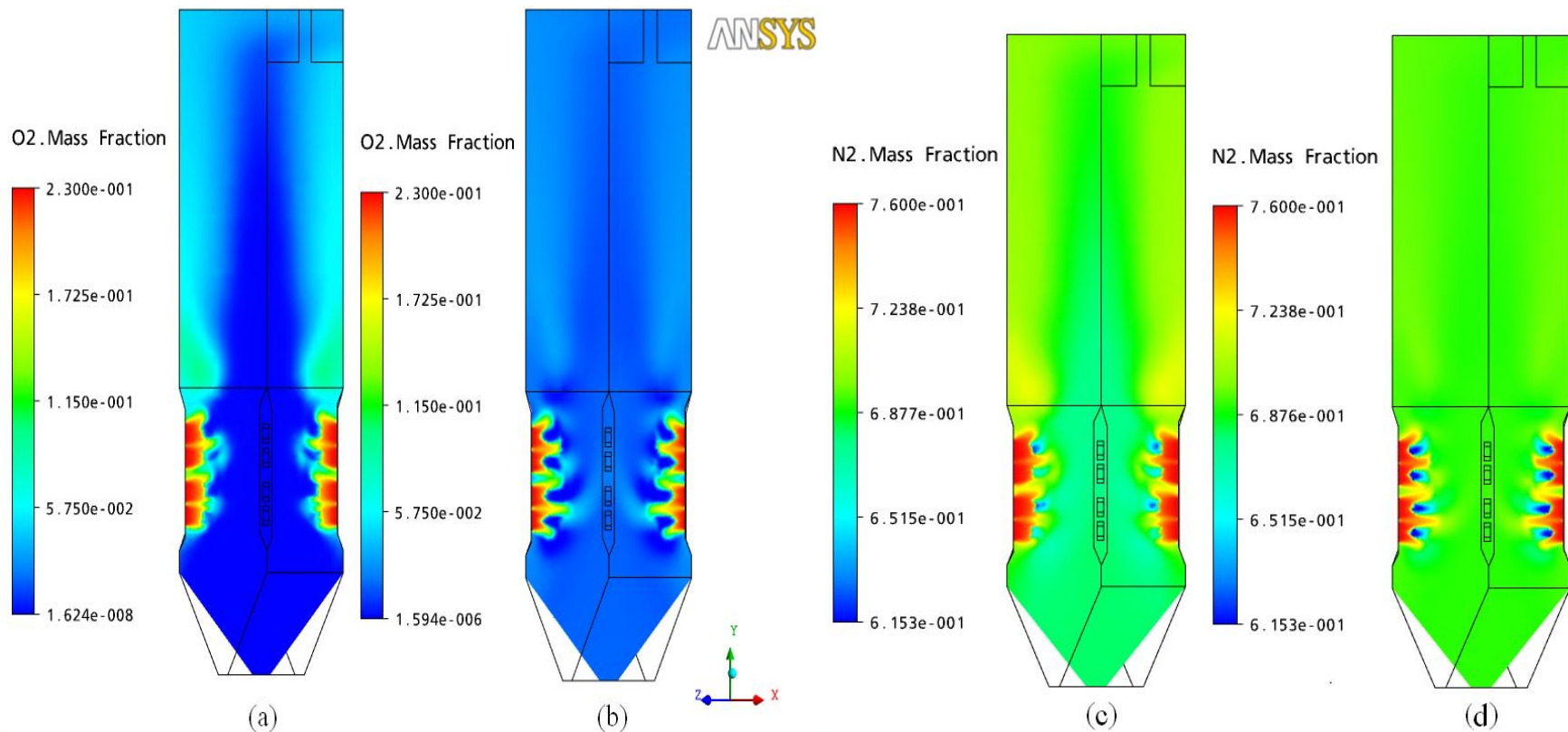
Primeira linha de queimadores: (a) CE3100; (b) CE4500.

Última linha de queimadores: (c) CE3100; (d) CE4500.



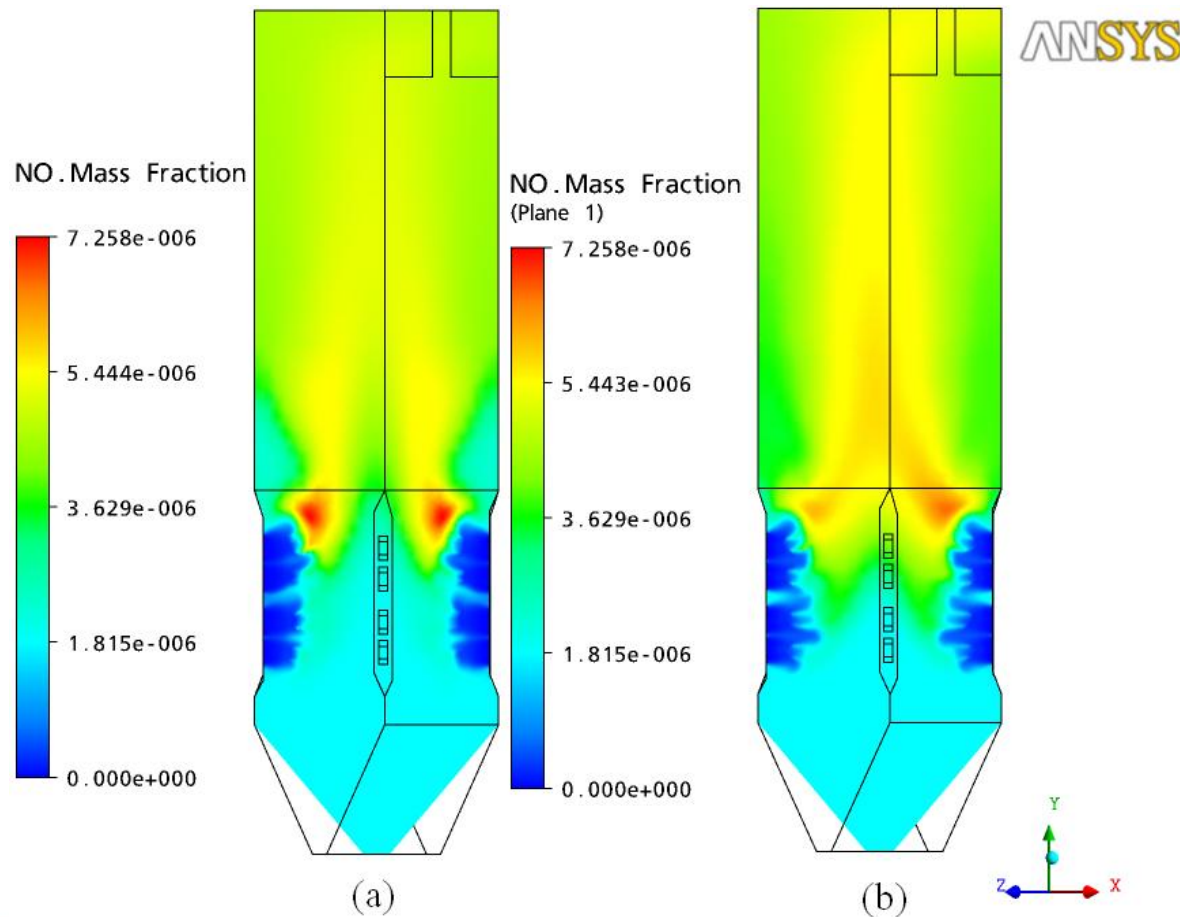
# Resultados

Frações mássicas de Oxigênio: (a) CE3100; (b) CE4500; e Nitrogênio: (c) CE3100; (d) CE4500.



# Resultados

Fração mássica de NO<sub>x</sub>: (a) CE3100; (b) CE4500.



# Resultados

|                  | Coal CE 3100                    |                   | Coal CE 4500                     |                  |
|------------------|---------------------------------|-------------------|----------------------------------|------------------|
|                  | Absolute value                  | Relative          | Absolute value                   | Relative         |
| Temperature      | <b>724.85 K</b>                 | -                 | <b>583.529 K</b>                 | -                |
| CO               | 2.7588x10 <sup>-5</sup> [kg/kg] | <b>27.580 ppm</b> | 1.59202x10 <sup>-6</sup> [kg/kg] | <b>1.59 ppm</b>  |
| CO <sub>2</sub>  | 0.220418 [kg/kg]                | 22.042 %          | 0.232534 [kg/kg]                 | 23.25 %          |
| CH <sub>4</sub>  | 2.6563x10 <sup>-7</sup> [kg/kg] | <b>0.265 ppm</b>  | 6.19368x10 <sup>-8</sup> [kg/kg] | <b>0.062 ppm</b> |
| H <sub>2</sub> O | 0.05403 [kg/kg]                 | 5.403 %           | 0.0542986 [kg/kg]                | 5.43 %           |
| N <sub>2</sub>   | 0.695099 [kg/kg]                | 69.510 %          | 0.692457 [kg/kg]                 | 69.25 %          |
| NOx              | 4.6898x10 <sup>-6</sup> [kg/kg] | <b>4.698 ppm</b>  | 4.8812 x10 <sup>-6</sup> [kg/kg] | <b>4.88 ppm</b>  |
| O <sub>2</sub>   | 0.0304151 [kg/kg]               | <b>3.041 %</b>    | 0.020704 [kg/kg]                 | <b>2 %</b>       |
| Total            | 1 [kg/kg]                       | 100 %             | 1 [kg/kg]                        | 100 %            |

## Conclusão

- Campos de temperatura e velocidade estão de acordo com o comportamento esperado para uma câmara de combustão com queima tangencial;
- Observando os campos de concentrações de  $O_2$  e  $N_2$  e o campo de temperaturas, pode-se dizer, baseado na formulação usada neste trabalho, que a ocorrência de  $NO_x$  também é coerente com o que ocorre na realidade, ao menos qualitativamente;
- O carvão beneficiado CE4500 apresenta melhores resultados, como esperado, em relação ao processo de combustão quando comparado ao carvão beneficiado CE3100.

# Agradecimentos

