

SIMULAÇÃO MATEMÁTICA TRI-DIMENSIONAL DE UM FORNO COM ENTRADA DE AR EM VÓRTICE

Takeo J. Fudihara

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Área de Desenvolvimento de Processos Químicos, C. P. 6066, CEP 13081-970, Campinas, SP, Brasil.
Endereço eletrônico: takeo@feq.unicamp.br.

Milton Mori

Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Área de Desenvolvimento de Processos Químicos, C. P. 6066, CEP 13081-970, Campinas, SP, Brasil.
Endereço eletrônico: mori@feq.unicamp.br (autor a quem as correspondências devem ser enviadas).

Resumo. A combustão gasosa turbulenta em vórtice nos fornos apresenta um comportamento fluido-dinâmico complexo com fenômenos tais como a reversão de fluxo, formação de zonas de recirculação, preservação do vórtice e alta sensibilidade ao projeto do queimador. Neste trabalho apresenta-se uma modelagem tri-dimensional de um forno e sua solução numérica obtida pelo método dos volumes finitos, usando coordenadas generalizadas para a geração da malha, a técnica dos multi-blocos, o modelo de turbulência $k-\epsilon$ e o modelo de combustão mixed-is-burnt através do código computacional CFX-F3D. O modelo geométrico mostrou uma capacidade satisfatória para a predição de todos os comportamentos fluido-dinâmicos, e os campos das variáveis podem ser observados através da visualização computacional.

Palavras-chave: Fornos, Fluido-dinâmica computacional, CFX.

1. INTRODUÇÃO

Chamas em vórtice são bastante utilizadas em fornos que requerem um alto nível de turbulência com um elevado desempenho de mistura, com o combustível e o ar injetados a altas velocidades através de um queimador. Estudos recentes de Kenbar *et al.* (1995) confirmam que as características da chama são fortemente influenciadas pelo esquema aerodinâmico do queimador. A influência decisiva da configuração geométrica sobre as características do fluxo também foram observadas no trabalho de Fudihara *et al.* (1998) para uma vazão multi-fásica em um reator de leito fluidizado. Entretanto, uma simulação 3-D simultânea do queimador e da câmara é extremamente difícil, principalmente devido à diferença entre as suas dimensões e à complexidade geométrica do queimador, que por ser muito menor requer um malha muito mais fina que a requerida pela câmara. No entanto, uma vez que ambos são conectados, e as malhas de ambos sejam coincidentes, uma malha reciprocamente fina é necessária na região da câmara que

se estende a partir da junção. Além disso, uma malha refinada é requerida nas regiões de fluxo complexo como nas de reversão e de recirculação.

Neste trabalho, um modelo tri-dimensional de um forno incluindo seu queimador, é simulado numericamente pelo método dos volumes finitos, aplicando o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ e o modelo de combustão *mixed-is-burnt*. O código fluido-dinâmico computacional CFX-F3D versão 4.2 é utilizado para a resolução das equações de transporte. Objetiva-se desta forma a obtenção de uma melhor compreensão dos complexos fenômenos produzidos por um queimador do tipo duplo concêntrico, sem pré-mistura entre os reagentes e com geração de vórtice pela injeção periférica do ar.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA

2.1 Equações de conservação

Os modelos matemáticos das médias temporais da decomposição de Reynolds que governam as transferências de massa, momento e energia, assim como o modelo de turbulência $k-\varepsilon$ e o modelo de combustão *mixed-is-burnt*, podem ser escritos como segue:

Equação da continuidade

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

Equação do momento

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla P + \mu_{eff} \nabla \cdot (\nabla u + (\nabla u)^T) \quad (2)$$

Equação da energia

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u H) = \frac{\partial P}{\partial t} - \nabla \cdot (-\lambda \nabla T) + Q_R \quad (3)$$

Modelo de turbulência $k-\varepsilon$

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{v_k} \right) \nabla k \right] + S_T - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{v_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 S_T - C_2 \rho \varepsilon) \quad (5)$$

A produção de cisalhamento (S_T) e a viscosidade são obtidos por:

$$S_T = \mu_{eff} \nabla u \cdot [\nabla u + (\nabla u)^T] - \frac{2}{3} \nabla \cdot u (\mu_{eff} \nabla \cdot u + \rho k) \quad (6)$$

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad , \quad \mu_{eff} = \mu + \mu_T \quad (7)$$

onde k é a energia cinética turbulenta, t é o tempo, u é o vetor velocidade, H é a entalpia global, P é a pressão, Q_R é o termo fonte de reação, λ é a condutividade térmica, μ é a viscosidade molecular, ρ é a massa específica, ε é a taxa de dissipação de k e ν é o número equivalente de Prandtl. As constantes do modelo de turbulência são: C_1 (1,92), C_2 (1,44), C_μ (0,09), ν_k (1,00) e ν_ε (1,30).

Modelo de combustão *mixed-is-burnt*. Duas equações de transporte adicionais são resolvidas com uma função densidade de probabilidade usada para resolver os escalares média-temporais da fração mássica dos gases de combustão para o cálculo da transferência de calor como mostrado a seguir (mais detalhes podem ser encontrados nos manuais do código CFX-F3D (1997) e em Lixing (1993)):

$$\frac{\partial \rho F}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u F) - \nabla \cdot \left(\left(\frac{\mu_T}{\nu_T} + \frac{\mu}{\nu_L} \right) \nabla F \right) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho G}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u G) - \nabla \cdot \left(\left(\frac{\mu_T}{\nu_T} + \frac{\mu}{\nu_L} \right) \nabla G \right) = C_{g1} \mu_T (\nabla F)^2 - C_{g2} \rho \frac{\varepsilon}{k} G \quad (9)$$

onde F é a fração de mistura média e G é a variância da fração de mistura. C_{g1} (2,22) e C_{g2} (2,00) são as constantes do modelo.

3. MÉTODOS NUMÉRICOS

Os métodos numéricos usados na solução das equações diferenciais parciais do modelo no domínio 3-D são o método dos volumes finitos co-localizado, coordenadas generalizadas, esquema de interpolação *upwind*, fatores de relaxação e regime falso transiente. O acoplamento pressão velocidade é o SIMPLEC e as equações algébricas são resolvidas pelo algoritmo *linear solver*. A geração da malha é feita dentro da técnica dos multi-blocos, o que reduz a distorção das células em relação à ortogonalidade (Patankar (1980) e Maliska (1995)). Os cálculos são conduzidos usando-se uma estação de trabalho SUN modelo SPARC 20.

4. CONDIÇÕES DE CONTORNO

As condições de contorno para a entrada são definidas como perfis uniformes, k_{ent} é aproximado por $0,002 u_{ent}^2$ e ε_{ent} por $k_{ent}/0,3D$, onde D é o diâmetro hidráulico. Condição de velocidade nula e adiabática são assumidas para as paredes. Condição de continuidade de fluxo é usada no plano de saída. Nas proximidades das paredes as variações nas propriedades turbulentas são ajustadas por funções de parede.

5. GEOMETRIA, MALHA E CONDIÇÕES OPERACIONAIS

A representação da geometria ou da malha do forno pode ser visualizada na Fig. 1. O caso em estudo baseia-se nas condições geométricas e operacionais apresentadas na Tabela 1, onde pode ser observado que o diâmetro da câmara é dez vezes maior que o diâmetro do duto externo do queimador. A representação do queimador do tipo duplo concêntrico pode ser observada em detalhes na Fig. 2. O fornecimento de ar no duto externo é feito através das quatro áreas de entrada *HexLe*, de acordo com o diagrama esquemático da Fig. 3, e o

combustível é fornecido através da área de entrada $\pi D_i^2/4$, ambos com a velocidade na direção normal à área de entrada e com um perfil uniforme. A mistura entre o ar e o combustível ocorre apenas no interior da câmara. O refinamento da malha dentro do método dos volumes finitos é de 59.008 células.

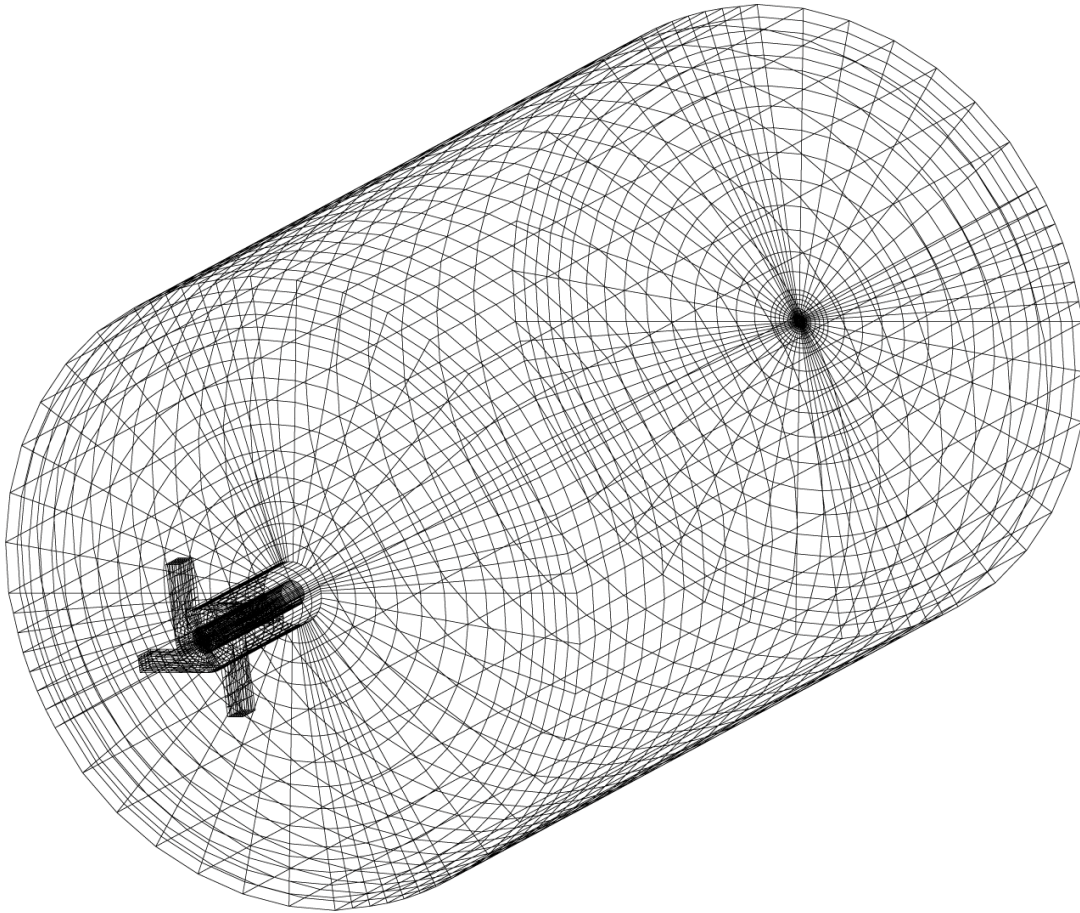


Figura 1 - Geometria e malha 3-D do forno.

6. RESULTADOS

Perfis de velocidade axial. Quando a representação dos campos de velocidade axial (referente à direção z) é separada em valores positivos e negativos, torna-se possível uma melhor visualização da reversão de fluxo no centro do forno como mostrado na Fig. 4. O gradiente de velocidade axial negativa observado próximo à parede cilíndrica ocorre devido à recirculação nesta região. Nas regiões mais afastadas da entrada, o escoamento aproxima-se do fluxo pistonado à baixas velocidades.

Perfis de velocidade radial. Por meio da representação dos campos de velocidade radial (referente à direção r) para apenas os valores positivos, como mostrado na Fig. 5, pode-se observar o comportamento do jato que direciona-se para a parede cilíndrica devido à força centrífuga. Próximo a esta parede o fluxo divide-se em duas frações, uma das quais constitui a recirculação citada anteriormente, e a outra vai em direção à saída do forno. Desta última fração, uma parte se juntará ao fluxo reverso da região central.

Tabela 1. Propriedades do caso em teste.

Condições Operacionais	Combustível	Velocidade de entrada u_{ent} (m/s)		40,0
		Temperatura de entrada (K)		298,0
		Composição	Fração mássica de N ₂	0,7
			Fração mássica de CH ₄	0,3
	Calor de combustão (J/kg)		5,001.E7	
Ar	Velocidade de entrada (m/s)		98,0	
	Temperatura de entrada (K)		298,0	
	Composição	Fração mássica de O ₂	0,22	
		Fração mássica de N ₂	0,78	
Geometria	Queimador	De (m)		0,25
		Di (m)		0,10
		He (m)		0,065
		Le (m)		0,10
	Câmara	Comprimento (m)		4,0
		Diâmetro (m)		2,5

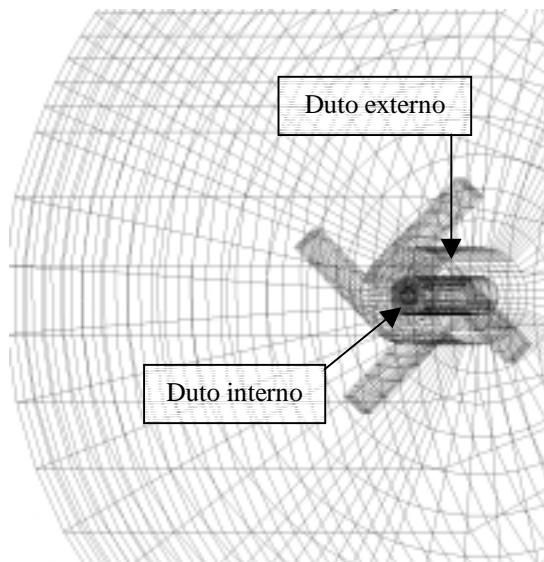


Figura 2 - Geometria e malha 3-D do queimador.

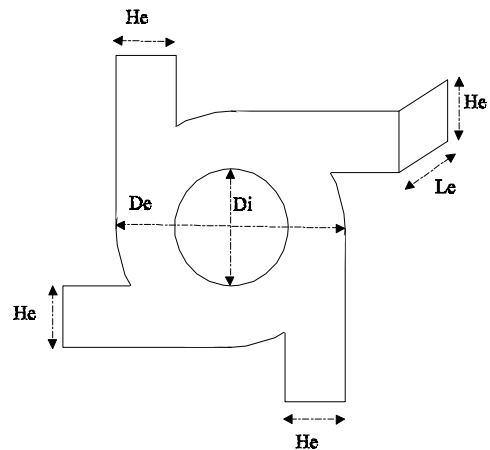


Figura 3 - Diagrama esquemático do queimador.

Perfis de velocidade tangencial. A Figura 6 apresenta os vetores resultantes entre as velocidades tangencial e radial. Essa resultante de velocidade, assim como o componente de velocidade axial estão presentes em toda a extensão do forno, e com maior intensidade na região de reversão do fluxo.

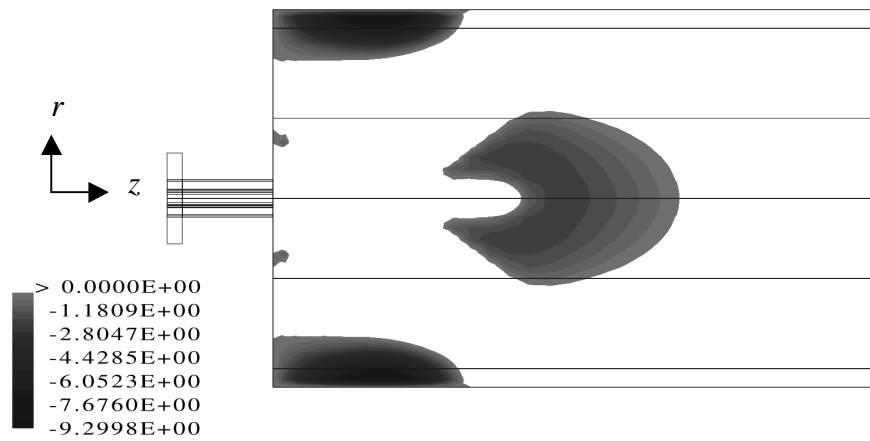


Figura 4 – Contornos de velocidade axial média para os valores negativos.

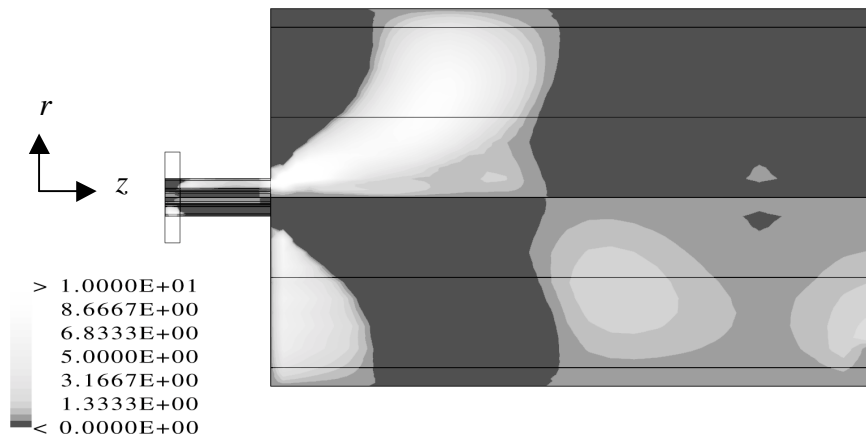


Figura 5 – Contornos de velocidade radial média para os valores positivos.

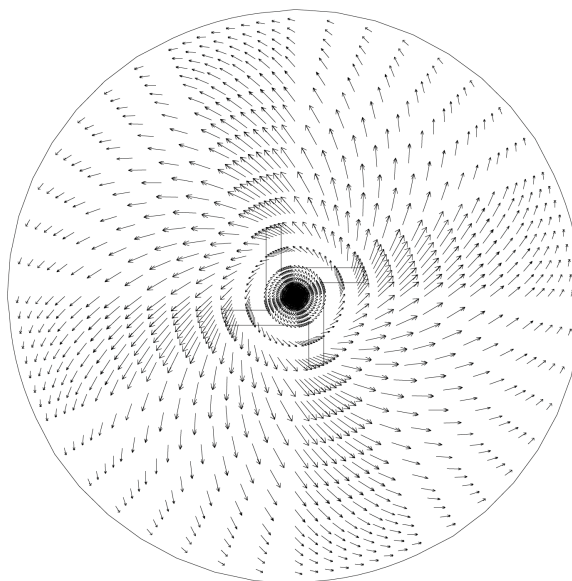


Figura 6 – Representação vetorial dos componentes tangenciais da velocidade.

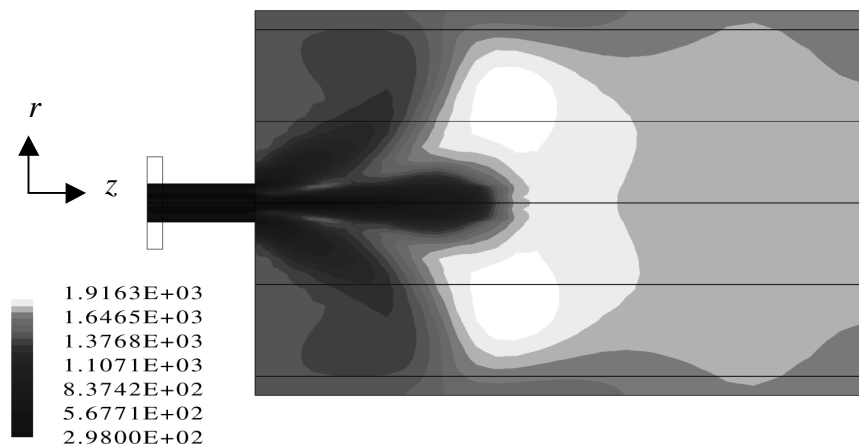


Figura 7 – Contornos de temperatura média (K).

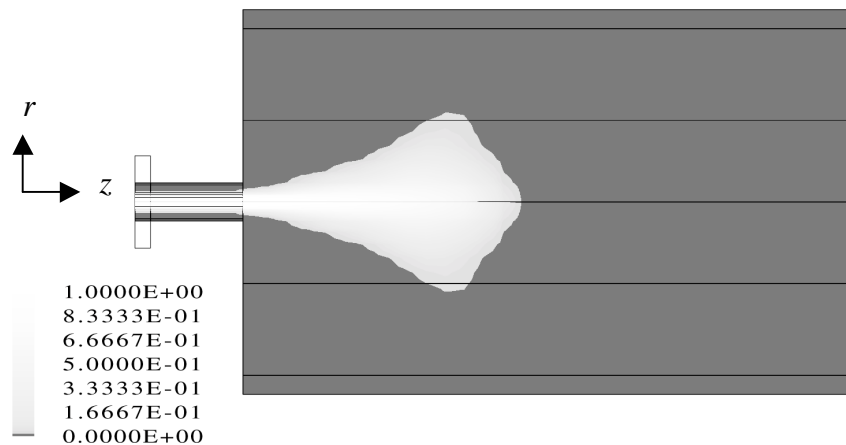


Figura 8 - Contornos da fração mássica média de combustível.

Distribuição de temperatura. Os contornos de temperatura estão mostrados na Fig. 7. O pico de temperatura é observado entre os jatos de ar e de combustível, fora do eixo de simetria, onde a mistura é intensa e a concentração dos reagentes é elevada. Na região mais próxima à saída os gradientes de temperaturas são muito menos intensos.

Fração mássica de combustível. Na câmara, praticamente todo o combustível é consumido próximo ao queimador como observado na Fig. 8, confirmando a intensa mistura proporcionada por este tipo de queimador.

7. CONCLUSÕES

As principais características do fenômeno da combustão em fornos aquecidos por uma chama produzida por um queimador do tipo duplo concêntrico com entrada de ar em vórtice foram reproduzidas nesta investigação numérica. O queimador com as quatro entradas de ar periféricas testado neste trabalho proporcionou um escoamento extremamente simétrico sem nenhum centro de vórtice secundário que é observado com entradas não simétricas. Os principais obstáculos confrontados foram: a grande diferença entre as dimensões do queimador e da câmara, requerindo a utilização de um grande número de volumes de controle;

a natural complexidade geométrica do queimador, que exigiu um grande número de blocos para a sua construção; métodos menos robustos como o algoritmo *line solver* foram necessários, assim como um passo de tempo extremamente reduzido para o falso transiente para assegurar a convergência numérica deste processo que envolve o fenômeno da combustão.

Com a elevada velocidade de entrada dos reagentes, o escoamento gasoso em vórtice produz um escoamento complexo, como observado na visualização computacional. A alta intensidade de giro utilizada ocasionou o característico fluxo reverso central, cujo fenômeno já foi relatado por Béer & Chigier (1972), onde o fluxo retorna pelo centro e colide com o jato. Esta região de reversão de fluxo é caracterizada por uma mistura intensa entre os reagentes e os produtos da combustão aquecidos. Longe desta região o escoamento assume um regime pistonado com baixas velocidades, mas o vórtice se mantém ao longo de todo o forno. Ao redor desta região de reversão de fluxo e confinadas entre as paredes, as recirculações se mostram intensas e complexas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (processo 96/05188-0) pelo suporte financeiro que possibilitou o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Beér, J. M. & Chigier, N. A., 1972, *Combustion Aerodynamics*, Applied Science Publishers Ltd.
- Fudihara, T. J.; Alves, J. J. N.; Martignoni, W. & Mori, M., 1998, Aplicação do código CFX-F3D na simulação tri-dimensional do escoamento gás-sólido diluído em tubos verticais, XII Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 14-17 Setembro, Porto Alegre, Brasil.
- Kenbar, A. M. A.; Beltagui, S. A. & Maccallum, N. R. L., 1995, Combustion aerodynamics of a gas-fired furnace with peripheral fuel injection, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 10, n. 3, pp. 335-346.
- Lixing, Z., 1993, *Theory and Numerical Modeling of Turbulent Gas-Particle Flows and Combustion*, Science Press.
- Maliska, C. R., 1995, *Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A..
- Manual CFX-4.2: Solver, 1997, AEA Industrial Technology, Harwell Laboratory, United Kingdom.
- Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporation.

THREE-DIMENSIONAL MATHEMATICAL SIMULATION OF A GAS-FIRED FURNACE WITH A SWIRLING FLOW

Abstract. *The gas combustion turbulent swirling flow in furnaces presents a complex fluid-dynamic behavior with phenomena such as reversion flow, recirculation zones, vortex preservation and high sensitivity to burner design. In this work we present a three-dimensional flow modelling and the numerical solutions obtained by the finite-volume with the body-fitted methods for grid generation and the multi-block technique, the $k-\varepsilon$ turbulence model and the mixed-is-burnt combustion model using the CFX-F3D computational fluid-dynamics code. The geometrical model shows a satisfactory capability to predicting all fluid dynamics behavior, and the variable fields are observed by the scientific visualization of the flows.*

Keywords: *Furnace, Computational fluid dynamics, CFX.*