



## MODELAGEM E SIMULAÇÃO 3-D DE UM ESCOAMENTO GASOSO EM UM CICLONE: UMA AVALIAÇÃO DOS EFEITOS GEOMÉTRICOS

### **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

### **Henry F. Meier**

Universidade de Blumenau, Centro de Ciências Tecnológicas, Departamento de Engenharia Química, Blumenau, SC, Brasil. Endereço eletrônico: meier@furb.rct-sc.br

### **Waldir P. Martignoni**

PETROBRAS/CENPES-SIX, Rio de Janeiro-RJ, Brazil.

### **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.** *O escoamento gasoso turbulento e em vórtice em ciclones apresenta um comportamento fluido-dinâmico complexo com fenômenos tais como alta preservação de vorticidade, reversão de fluxo, zonas de recirculação, comportamento anisotrópico dos tensores de Reynolds e alta sensibilidade para os efeitos de entrada. Neste trabalho apresenta-se uma modelagem 3-D e as soluções numéricas obtidas pelo método dos volumes finitos em coordenadas generalizadas. Os resultados numéricos são obtidos usando o código fluido-dinâmico computacional CFX-F3D. A avaliação dos efeitos dos dispositivos de entrada e saída e do sistema de coleta de pó são observados pela visualização científica dos escoamentos. O modelo de turbulência  $k-\epsilon$  e o modelo dos tensores diferenciais são comparados. Os modelos mostraram uma capacidade satisfatória de predição dos comportamentos fluido-dinâmicos para as mudanças nas condições geométricas.*

**Palavras-chave:** *Ciclone, Fluido-dinâmica computacional, CFX*

## 1. INTRODUÇÃO

Ciclones oferecem um vasto campo de aplicações em várias indústrias. Ao contrário de sua flexibilidade e simplicidade, seu comportamento fluido-dinâmico é complexo, apresentando ao mesmo tempo fenômenos tais como reversão de fluxo, zonas de recirculação, alta preservação de vorticidade, entre outros. No projeto dos ciclones, as correlações

empíricas, os métodos analíticos e semi-analíticos estão sendo gradativamente substituídos pelas novas técnicas da fluido-dinâmica computacional. Um estudo através destas novas técnicas, analisando-se os efeitos geométicos sobre um reator de leito fluidizado de uma unidade de craqueamento catalítico, foi realizado por Fudihara *et al.* (1998) com escoamento multi-fásico. Dentro destas unidades, os ciclones desempenham funções de importância fundamental como separadores das partículas de catalisador em condições severas de temperatura e pressão. Recentemente, as aplicações dos ciclones vêm se estendendo a novos processos tais como transferência de calor com reações químicas e a processos de separação de alto desempenho para micro-partículas, os quais exigem um maior conhecimento da fluido-dinâmica envolvida. Este conhecimento torna-se possível apenas pela avaliação rigorosa das soluções numéricas das equações de transferência junto ao fenômeno da turbulência. Meier and Mori (1998a,1998b) realizaram estudos em regime turbulento de ciclones usando técnicas 2-D axi-simétrica da fluido-dinâmica computacional. Visando a obtenção de melhores representações do escoamento turbulento, o presente trabalho consiste na modelagem e simulação 3-D do escoamento gasoso em um ciclone. O código computacional CFX-F3D versão 4.2, desenvolvido pela empresa AEA Technology, foi utilizado para a solução dos modelos fenomenológicos assim como para a geração da malha numérica.

## 2. MODELAGEM MATEMÁTICA

### 2.1 Equações da conservação

Os modelos matemáticos médias-temporais da decomposição de Reynolds podem ser escritos como segue:

**Equação da continuidade.**

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

**Equações da quantidade de movimento**

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p - \nabla \cdot (\tau + \overline{\rho u' u'}) + \rho g \quad (2)$$

onde  $u$  é o vetor velocidade,  $t$  é o tempo,  $\rho$  é a massa específica,  $g$  é o campo gravitacional,  $p$  é a pressão,  $\tau$  é o tensor viscoso e  $\overline{\rho u' u'}$  é o tensor de Reynolds.

### 2.2 Modelos de turbulência

**Modelo k-ε.** No modelo k-ε o tensor de Reynolds é aproximado por:

$$-\overline{\rho u' u'} = -\frac{2}{3} \rho k \delta - \frac{2}{3} \mu_T \nabla \cdot u \delta + \mu_T (\nabla u + (\nabla u)^T) \quad (3)$$

onde  $\mu_T$  é a viscosidade turbulenta,  $\delta$  é o tensor identidade e o superescrito  $T$  é a operação da transposta.

A energia cinética turbulenta ( $k$ ) e a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta ( $\epsilon$ ) são obtidos por:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u k) = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \mathbf{P} - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \varepsilon) = \nabla \cdot \left( \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mathbf{P} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

onde  $\mathbf{P}$  é o termo de produção de cisalhamento,

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

e as viscosidades são calculadas por

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

onde  $C_1$  (1,92),  $C_2$  (1,44),  $C_\mu$  (0,09),  $\sigma_k$  (1,00) e  $\sigma_\varepsilon$  (1,30) são constantes do modelo.

**Modelos dos tensores diferenciais.** No modelo dos tensores diferenciais o tensor de Reynolds  $\overline{u'u'}$  deve satisfazer à seguinte equação de conservação:

$$\frac{\partial \rho \overline{u'u'}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \overline{u'u'u}) - \nabla \cdot \left( \rho \frac{C_S}{\sigma_{DS}} \frac{k}{\varepsilon} \overline{u'u'(\nabla u'u')^T} \right) = \mathbf{P} - \frac{2}{3} \rho \varepsilon \delta_{\alpha\beta} \delta_{\alpha\beta} \quad (8)$$

onde o termo de produção de cisalhamento é calculado por:

$$\mathbf{P} = -\rho \overline{u'u'(\nabla u)^T} + (\nabla u) \overline{u'u'} \quad (9)$$

Portanto, seis equações de transporte dos tensores de Reynolds devem ser resolvidas. Além disso uma equação para  $\varepsilon$  é novamente requerida:

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \varepsilon) - \nabla \cdot \left( \rho \frac{C_S}{\sigma_\varepsilon} \frac{k}{\varepsilon} \overline{u'u'} \nabla \varepsilon \right) = C_1 \frac{\varepsilon}{k} \mathbf{P} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (10)$$

onde  $C_S$  (0,22),  $\sigma_{DS}$  (1,0) e  $\sigma_\varepsilon$  ( $C_S/0,16$ ) são constantes do modelo.

Mais detalhes sobre estes modelos podem ser obtidos do manual do CFX (1997).

### 3. CONDIÇÕES DE CONTORNO

A condição de contorno para a entrada é definida como perfil de velocidade uniforme. Nas paredes a velocidade é nula, sendo que nas suas proximidades as variações nas propriedades turbulentas são ajustadas por funções de parede. A condição de contorno no plano do tubo de saída é definida como continuidade de fluxo.

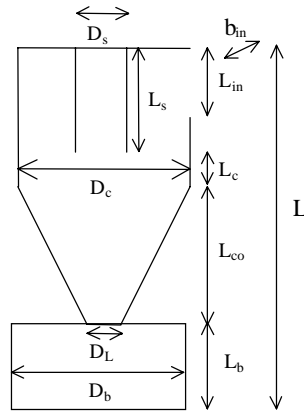


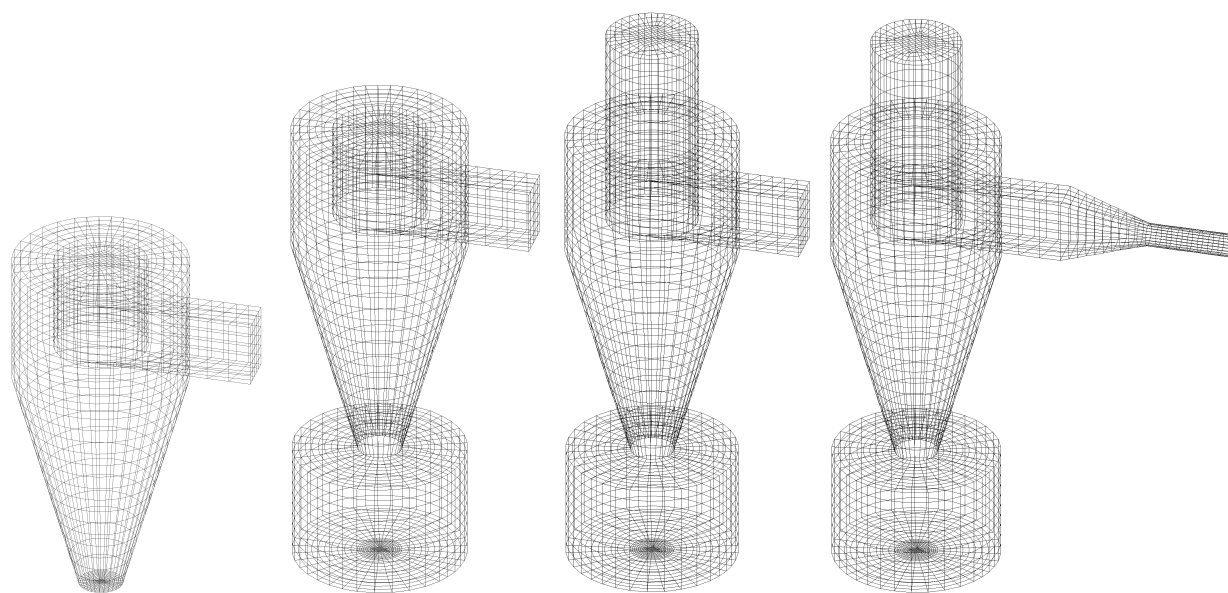
Figura 1 – Diagrama esquemático do ciclone.

Tabela 1. Propriedades do caso em teste

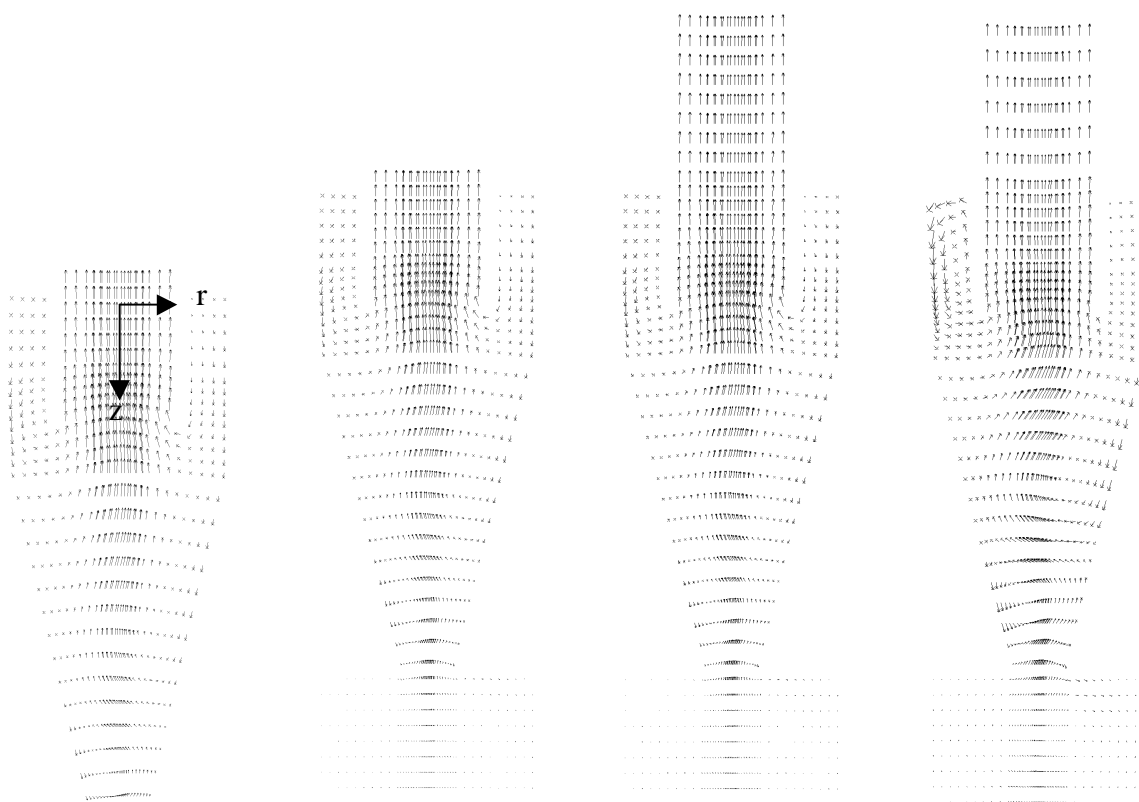
		Propriedades	Yuu <i>et al.</i>
<b>Condições Operacionais</b>	Velocidade de entrada (m/s)		9,800
	Vazão Volumétrica (m <sup>3</sup> /s)		0,05929
	Tipo de fluido		Ar
	Temperatura (K)		293
<b>Propriedades Físicas</b>	Massa Específica (kg/m <sup>3</sup> )		1,142
	Viscosidade (kg/m.s)		1,85 10 <sup>-5</sup>
<b>Geometria</b>		$L_{in}$ (m)	0,1100
		$L_s$ (m)	0,1600
		$L_c$ (m)	0,0600
		$L_{co}$ (m)	0,4000
		$L_b$ (m)	0,2000
		$L$ (m)	0,6200
		$D_s$ (m)	0,1520
		$D_c$ (m)	0,2960
		$D_L$ (m)	0,0750
		$D_b$ (m)	0,2960
	$b_{in}$ (m)	0,0550	

#### 4. MÉTODOS NUMÉRICOS

Os métodos numéricos usados na solução das equações diferenciais parciais são: volume finito co-localizado, acoplamento pressão velocidade SIMPLEC, esquema de interpolação *upwind*, fatores de relaxação e falso transiente. As equações algébricas são resolvidas pelo algoritmo *Block Stone* e a geração da malha é feita através da técnica dos multi-blocos.



(a) (b) (c) (d)  
 Figura 2 - Geometria e malha 3-D: (a) malha 1; (b) malha 2; (c) malha 3; (d) malha 4.



(a) (b) (c) (d)  
 Figura 3 – Vetores Velocidade: (a)malha 1; (b)malha 2; (c) malha 3; (d) malha 4.

## 5. GEOMETRIA E CONDIÇÕES OPERACIONAIS

O caso em estudo (Tabela 1) baseia-se nas condições geométricas e operacionais usadas por Yuu *et al.* (1978), onde  $D$  é o diâmetro e  $L$  é o comprimento. A Figura 1 mostra o diagrama esquemático do ciclone com os dados geométricos apresentados na Tabela 1.

Para a geração das malhas utiliza-se o sistema de coordenadas generalizadas. Quatro tipos de malhas são escolhidas e comparadas. A Figura 2 mostra a visualização das quatro malhas usadas nesta avaliação geométrica 3-D do ciclone.

- Malha 1: Ciclone sem os dispositivos de entrada e saída e sem o sistema de coleta de pó. O número de células para o método dos volumes finitos é de 10.941;

- Malha 2: Ciclone sem os dispositivos de entrada e saída e com o sistema de coleta de pó. O número de células para o método dos volumes finitos é de 18.231;

- Malha 3: Ciclone com o tubo de saída e com o sistema de coleta de pó. O número de células para o método dos volumes finitos é de 19.743;

- Malha 4: Ciclone com o tubo de saída, com o dispositivo de entrada que se expande de uma seção transversal cilíndrica para uma retangular e com o sistema de coleta de pó. O número de células para o método dos volumes finitos é de 19.905.

As soluções numéricas são obtidas para todas as malhas, sendo que o modelo dos tensores diferenciais foi utilizado apenas para a malha 3 devido à convergência extremamente lenta quando comparada ao modelo k- $\epsilon$ , devido à existência de seis equações adicionais para os tensores de Reynolds. Os cálculos foram realizados em uma estação de trabalho SUN, modelo SPARC 20.

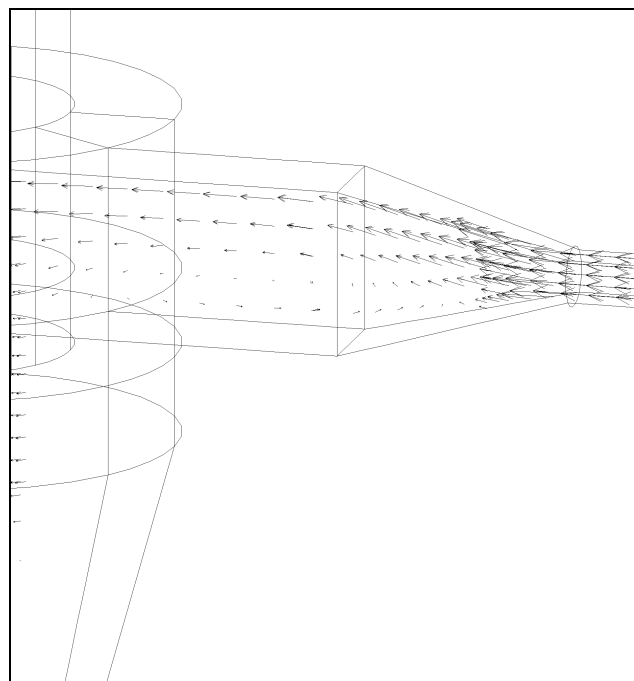


Figura 4 - Vetores velocidade na entrada da malha 4.

## 6. RESULTADOS

### 6.1 Efeitos da geometria sobre o escoamento do gás

A Figura 3(a,b,c,d) apresenta os vetores velocidade para as malhas de 1 a 4 respectivamente. Como pode ser observado os dispositivos de saída e o sistema de coleta de pó apresentam pouca influência sobre as características do escoamento.

Entretanto, como se observa na Figura 3(d) que representa a malha 4, o campo de velocidades apresenta sensíveis diferenças em comparação aos resultados das outras malhas. A Figura 4 revela irregularidades do escoamento ao longo da entrada desta malha, apresentando regiões de recirculação do fluxo.

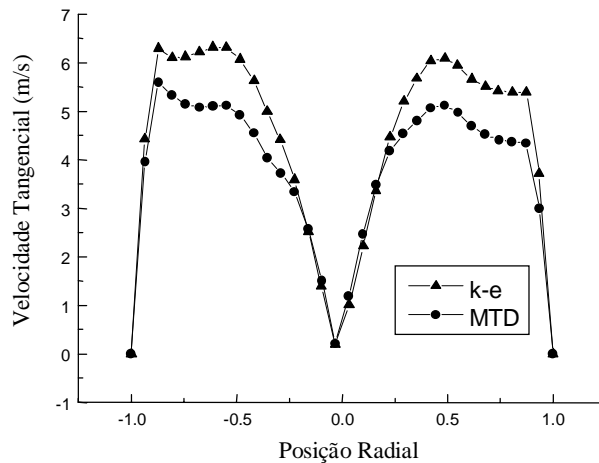


Figura 5 – Perfis radiais da velocidade tangencial usando o modelo k- $\epsilon$  e o modelo dos tensores diferenciais (MTD).

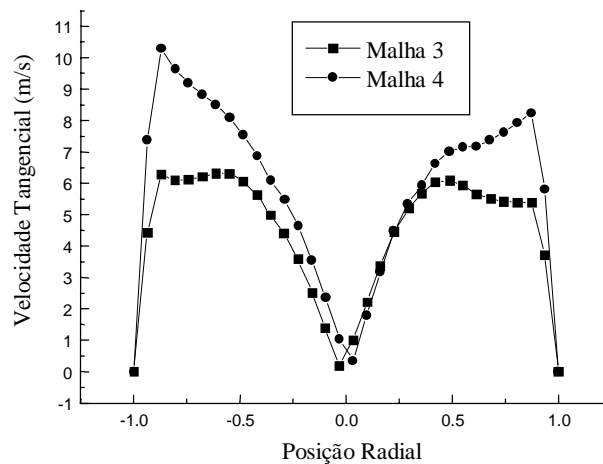


Figura 6 – Perfis radiais da velocidade tangencial usando o modelo k- $\epsilon$  com a malha 3 e 4.

## 6.2 Representação dos perfis radiais

Os perfis radiais obtidos com a malha 3 podem ser vistos nas Figuras 5 e 7. A Figura 5 mostra dois picos de velocidade tangencial, coletados numa posição axial de 0,19 m. Estes picos também foram observados experimentalmente (Yuu *et al.*, 1978). A Figura 6 mostra os

efeitos geométricos do dispositivo de entrada da malha 4 sobre a velocidade tangencial usando-se os mesmos valores de vazão volumétrica em ambas as malhas, e com os dados coletados na mesma posição axial. As pressões relativas coletadas em três posições axiais estão representadas na Figura 7, revelando-se a distribuição não simétrica na direção radial, fato que não é possível de ser detectado numa simulação 2-D, e que pode ser um fator expressivo numa investigação mais rigorosa.

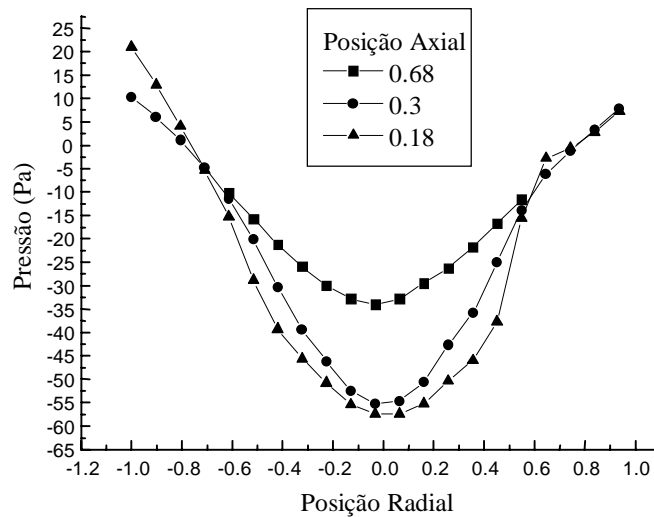


Figura 7: Perfis radiais de pressão na direção da co-ordenada x.

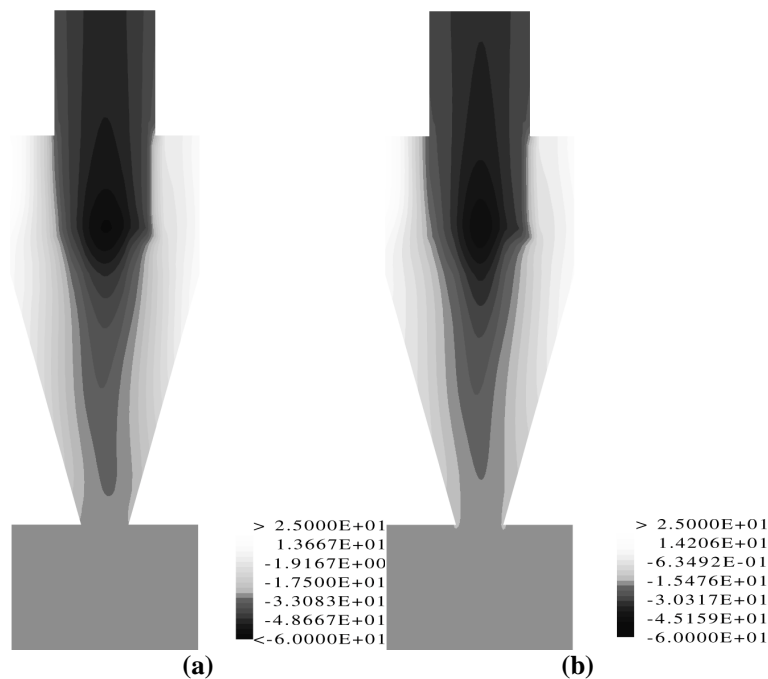


Figura 8 – Campo de pressão para a malha 3 obtido com: (a) model  $k-\epsilon$ ; (b) modelo dos tensores diferenciais.



### 6.3 Modelo k-ε versus modelo dos tensores diferenciais

A Figura 5 apresenta os perfis radiais da velocidade tangencial obtidos com a malha 3 para os modelos de turbulência k-ε e dos tensores diferenciais, mostrando-se os desvios entre ambos. A Figura 8 apresenta os campos de pressão relativa usando-se estes dois modelos de turbulência, mostrando sensíveis diferenças principalmente na região central do ciclone. Os resultados mostraram que a queda de pressão global é ligeiramente maior para o modelo k-ε.

## 7. CONCLUSÕES

Um modelo fluido-dinâmico tri-dimensional para o escoamento gasoso turbulento em ciclones é usado na avaliação dos efeitos geométricos. A presença dos sistema de coleta de pó e do tubo de saída não apresentaram efeitos significativos sobre o escoamento no ciclone. Entretanto, o efeito do dispositivo de entrada apresentou uma influência decisiva sobre as variáveis fluido-dinâmicas, como pode ser observado nas representações vetoriais do corte longitudinal e do corte no duto de entrada, e pelo perfil das velocidades tangenciais. Portanto uma análise rigorosa do comportamento fluido-dinâmico deverá envolver o conhecimento detalhado da configuração geométrica particular da entrada do ciclone. Os modelos de turbulência k-ε e dos tensores diferenciais foram testados apresentando pequenas diferenças na distribuição da pressão e nos picos da velocidade tangencial.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (processos 96/05188-0, 95/0487-7 e 97/07624-5) e à PETROBRAS, Petróleo Brasileiro-SA, pelo suporte financeiro que possibilitou a execução deste trabalho.

### REFERÊNCIAS

- 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.
- Manual CFX-4.2: Solver, 1997, AEA Technology, United Kingdom.
- Meier, H. F. & Mori, M., 1998b, Gas-solid flow in cyclones: the eulerian-eulerian approach, Computers & Chemical Engineering, vol. 22, Suppl., pp. S641-S644.
- Meier, H. F., 1988a, Modelagem fenomenológica e simulação bi-dimensional de ciclones por técnicas da fluido-dinâmica computacional, Ph.D. diss., Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, Brasil.
- Yuu, S.; Jotaki, T. & Yoshida, K., 1978, The reduction of pressure drop due to dust loading in a conventional cyclone, Chem. Eng. Sci., vol 33, pp. 1573-1580.

### 3-D MODELLING AND SIMULATION OF A GAS FLOW IN A CYCLONE: AN ANALYSIS OF GEOMETRICAL EFFECTS

**Abstract.** *The gas turbulent swirling flow in cyclones presents a complex fluid-dynamic behavior with phenomena such as high vortex preservation, reversion flow, recirculation zones, anisotropic behavior of the Reynolds stress and high sensibility for the inlet effects. In this work we present a 3-D flow modelling and the numerical solutions obtained by the finite-*

*volume methods with body fitted for the grid generation. All numerical results are obtained using the CFX-F3D computational fluid-dynamics code. The effects analysis of the inlet and outlet devices and dust collection system are observed by the scientific visualization of the flows. The  $k-\varepsilon$  turbulence model and the Differential Stress Model are compared. Both models show a satisfactory capability of predicting the fluid dynamics behavior for changes in the geometrical conditions.*

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