

UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE VOLUMES FINITOS NA SOLUÇÃO DO ESCOAMENTO EM CICLONES EM COORDENADAS GENERALIZADAS

Dilênio P. de Souza - dilenio@labsin.ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina - Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, LABSIN - Laboratório de Simulação Numérica de Sistemas Químicos
CEP 88040-900 - Caixa Postal 476, Florianópolis, SC, Brasil

Henry F. Meier - meier@furb.rct-sc.br

Universidade Regional de Blumenau - Departamento de Engenharia Química, LFC – Laboratório de Fluidodinâmica Computacional
CEP 89010-971 - Caixa Postal 1507, Blumenau, SC, Brasil

Antonio A. Ulson de Souza - augusto@enq.ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina - Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, LABSIN - Laboratório de Simulação Numérica de Sistemas Químicos
CEP 88040-900 - Caixa Postal 476, Florianópolis – SC

***Resumo.** O presente trabalho apresenta um estudo do escoamento turbulento em ciclones a partir das técnicas da fluidodinâmica computacional. O modelo matemático desenvolvido está baseado nas equações fundamentais de conservação da massa e quantidade de movimento, na forma conservativa, transformadas para o sistema de coordenadas generalizadas, considerando-se o escoamento monofásico, isotérmico e turbulento. É empregada uma discretização do domínio a partir de uma linha coordenada coincidente com as fronteiras do problema físico, com uma malha estruturada. As equações governantes são tratadas pela técnica de volumes finitos, com um arranjo co-localizado das variáveis. Para o acoplamento pressão-velocidade, utiliza-se o método SIMPLEC. Os resultados do modelo numérico apresentam boa concordância quando comparados com os dados experimentais encontrados na literatura.*

***Palavras-chave:** Ciclones, Fluidodinâmica computacional, Coordenadas generalizadas.*

1. INTRODUÇÃO

Os ciclones são equipamentos normalmente destinados à separação de partículas sólidas de uma corrente fluida. Porém, este pode ser utilizado como classificador, reator, secador, entre outros. O baixo custo de manutenção e construção do equipamento, além da alta eficiência de coleta para as partículas com diâmetro superior a $5\mu\text{m}$, é que os torna muito atraentes.

Os ciclones são dispositivos mecânicos, com formato cônico-cilíndrico, que possuem uma entrada lateral e duas saídas, uma inferior ("underflow") e outra superior ("overflow"),

orientadas no eixo central, como ilustra a Fig. 1. O segmento cilíndrico, que se adentra ao ciclone na saída superior, de comprimento L_s , é denominado de "vortex finder".

O campo centrífugo gerado nos ciclones é resultante da configuração do equipamento e do modo com que a suspensão é alimentada. As partículas, devido à ação da força centrífuga, deslocam-se em direção à parede do ciclone, realizando um movimento circular. Deste modo, as partículas escoam próximo à parede em direção ao coletor de sólidos. No seu percurso, as partículas descrevem uma trajetória helicoidal sob a ação do arraste, da gravidade e do atrito com as paredes do equipamento. O escoamento em espiral apresenta componentes de velocidade nas direções radial, tangencial e axial, com alta preservação de vórtice, regiões de recirculação, forte turbulência, contato fluido-sólido, entre outros fenômenos, que tornam o comportamento fluidodinâmico nos ciclones muito complexo.

Com o objetivo de utilizar uma técnica que esteja amparada por uma descrição fenomenológica consistente, que possa ser aplicada em quaisquer ciclones e em diferentes condições de operações, será empregada uma modelagem matemática que baseia-se nas leis de conservação da massa e da quantidade de movimento.

As equações do modelo matemático resultante serão resolvidas através de técnicas numéricas da fluidodinâmica computacional ("Computational Fluid Dynamics" - CFD), permitindo a análise de fenômenos que com as técnicas empíricas e semi-empíricas seriam impossíveis, como a predição do campo de velocidade no interior de ciclones.

O objetivo principal do presente trabalho é o desenvolvimento de uma ferramenta numérica para analisar o escoamento em ciclones. Utilizou-se um modelo de turbulência anisotrópico, sendo que os comprimentos de mistura foram ajustados aos dados experimentais.

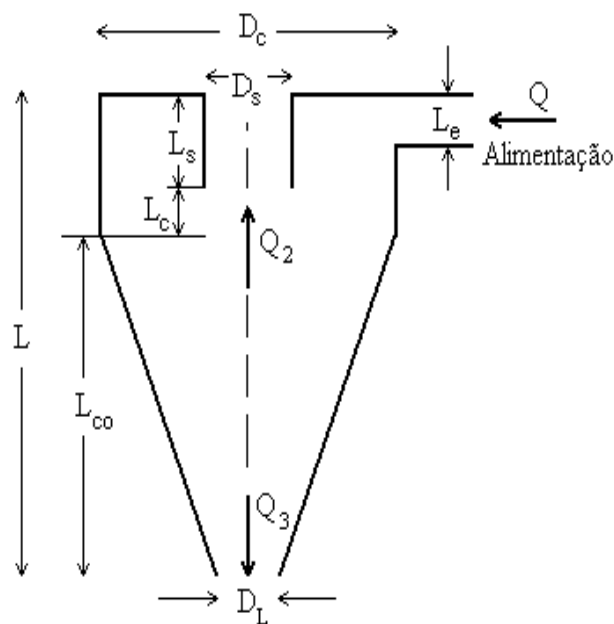


Figura 1. Representação esquemática do ciclone

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

As simulações utilizando o modelo desenvolvido são realizadas nas condições operacionais e com os parâmetros geométricos apresentados na Tabela 1, sendo o ciclone em estudo do tipo Bernauer/Lapple.

Na entrada do ciclone, o escoamento é essencialmente tridimensional. No entanto, assume-se a simplificação de que a axissimetria seja alcançada rapidamente, de tal forma que a entrada possa ser considerada também bidimensional. Para maior facilidade da aplicação da condição de contorno, a geometria da tubulação da corrente de alimentação será virtualmente alterada, abrangendo toda a circunferência do corpo cilíndrico do ciclone. Portanto, as velocidades radiais e tangenciais são distribuídas uniformemente ao longo da região de entrada, sendo estas calculadas pelas seguintes equações:

$$u_{in} = \frac{Q}{\pi D_c L_e} \quad (1)$$

$$v_{in} = \frac{4Q}{\pi L_e^2} \quad (2)$$

onde Q é a vazão volumétrica de alimentação, L_e a altura da seção de entrada do ciclone, D_c o diâmetro do ciclone, u_{in} e v_{in} são as velocidades radiais e tangenciais na entrada, respectivamente.

Tabela 1 - Configuração operacional e geométrica do ciclone estudado.

Propriedades		Ciclone
Condições Operacionais	Velocidade tangencial na entrada v_{in} (m/s)	5,380
	Velocidade radial na entrada u_{in} (m/s)	0,3044
	Vazão de gás m^3/s	0,07532
Configuração Geométrica	L_e (m)	0,2500
	L_s (m)	0,3280
	L_c (m)	0,2880
	L_{co} (m)	0,7600
	L (m)	1,3760
	D_s (m)	0,1600
	D_c (m)	0,3150
	D_L (m)	0,0950
	b_{in} (m)	0,0560
	A_{in} (m)	0,0140

Conforme pode ser visto na Fig. 1, L_c é o comprimento da seção cilíndrica, L_{co} o comprimento da seção cônica, L o comprimento do ciclone, D_L o diâmetro do “underflow”, D_s o diâmetro do “overflow”, b_{in} é a largura da seção de entrada do ciclone e A_{in} a área de alimentação do ciclone.

Nas paredes laterais do ciclone, são consideradas condições de não-deslizamento para as velocidades radiais e axiais. Para a velocidade tangencial, é utilizada a função de parede apresentada por Patterson e Munz (1989, 1996), onde:

$$\frac{v_w}{v_{in}} = 0,202 \text{Re}_{in}^{0,169} \quad (3)$$

sendo que v_w é a velocidade tangencial nas paredes cônica e cilíndrica do ciclone e Re_{in} é o número de Reynolds na entrada do ciclone, dado pela Eq. (4).

$$\text{Re}_{in} = \frac{\rho v_{in} (D_c - D_s)}{\mu} \quad (4)$$

onde D_s é o diâmetro do "vortex finder", ρ a massa específica do fluido e μ a viscosidade laminar do fluido.

Nas paredes do cilindro interno ("vortex finder") e do topo do ciclone são consideradas condições de não-deslizamento para os três componentes de velocidade. Na saída superior ("overflow") e inferior ("underflow") do ciclone é aplicada a condição de derivada axial nula para todos os componentes do vetor velocidade.

A vazão de alimentação é a mesma na qual foram obtidos os dados experimentais apresentados por Cremasco (1994), sendo estes dados utilizados para corroborar os resultados obtidos no presente trabalho.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA

Apresenta-se nesta seção uma modelagem matemática fenomenológica baseada nos princípios de conservação da massa e da quantidade de movimento, escritas para um sistema gasoso, monofásico, isotérmico e turbulento. O escoamento será tratado como bidimensional, ou seja, serão desprezados os efeitos assimétricos na entrada. A consequência desta hipótese é que as derivadas com relação a coordenada θ podem ser negligenciadas.

As equações de conservação, resultantes da aplicação das hipóteses descritas acima, podem ser expressas no sistema de coordenadas generalizadas (ξ, η) , na sua forma conservativa, onde a transformação das equações de conservação do sistema de coordenadas cilíndrico para o generalizado pode ser encontrada em Souza (2000):

$$\begin{aligned} \frac{1}{J} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \xi} [r\rho\phi U] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \eta} [r\rho\phi W] = & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(C_1 \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + C_2 \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right) + \\ & + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(C_2 \frac{\partial \phi}{\partial \xi} + C_3 \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right) + \frac{S^\phi}{J} \end{aligned} \quad (5)$$

onde $C_1 = Jr\Gamma^\phi\alpha$, $C_2 = -Jr\Gamma^\phi\beta$, $C_3 = Jr\Gamma^\phi\gamma$, sendo α , β e γ os componentes do tensor métrico, J o Jacobiano da transformação, U e W os componentes contravariantes do vetor velocidade sem normalização métrica e S^ϕ representa o termo fonte da Eq. (5). Os parâmetros ϕ , $\Gamma_{r,j}^\phi$, $\Gamma_{z,j}^\phi$ e S^ϕ do modelo geral são apresentados nas Tabelas 2 e 3. Uma descrição geométrica e interpretação física de algumas relações matemáticas, envolvendo a transformação de coordenadas, podem ser obtidas em Maliska (1995) e Perez (1987).

Tabela 2 - Definição das variáveis ϕ , Γ^ϕ e S^ϕ

Conservação	ϕ	Γ^ϕ	S^ϕ
Massa	1	0	0
Momento radial	u	$\mu_{r,z}^{ef}$	S^u
Momento tangencial	v	$\mu_{r,\theta}^{ef}$	S^v
Momento axial	w	$\mu_{r,z}^{ef}$	S^w

Tabela 3 - Termos fontes da Eq. (5)

S^ϕ
$S^u = \frac{v^2 \rho}{r} - \frac{\mu_{\theta,\theta}^{ef} u}{r} - \frac{\partial P}{\partial r}$
$S^v = -\frac{\rho uv}{r} - \frac{\mu_{r,\theta}^{ef} v}{r^2}$
$S^w = \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z}$

A viscosidade efetiva é calculada através de um modelo similar ao comprimento de mistura de Prandtl. Como o escoamento é altamente anisotrópico, são utilizados dois comprimentos de mistura, um para o cálculo da viscosidade efetiva turbulenta na direção tangencial e outro na direção radial e axial, como adotado por Lilley e Chigier (1971):

$$\mu_{\theta,\theta}^t = \mu_{r,\theta}^t = \mu_{z,\theta}^t = \mu^L + \rho l_{r,\theta}^2 \left| \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right| \quad (6)$$

$$\mu_{r,r}^t = \mu_{r,z}^t = \mu_{z,z}^t = \mu^L + \rho l_{r,z}^2 \left| \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right| \quad (7)$$

onde $l_{r,\theta}$ e $l_{r,z}$ são $0,028r$ e $0,20r$, respectivamente, sendo que estes valores foram ajustados de forma a se obter uma melhor concordância entre os dados experimentais e os numéricos.

4. FORMULAÇÃO NUMÉRICA

O Método de Volumes Finitos foi utilizado para resolver as equações de conservação de massa e quantidade de movimento linear. As equações foram integradas no sistema de coordenadas generalizadas (ξ, η) em cada volume de controle resultante da discretização do domínio de cálculo.

A técnica dos volumes fictícios foi utilizada para a aplicação das condições de contorno, uma vez que esta facilita bastante a implementação computacional. Para o cálculo das propriedades ϕ e de suas derivadas nas faces dos volumes de controle, é utilizada a função de interpolação WUDS, proposta por Raithby e Torrance (1974). O acoplamento pressão-velocidade foi feito pelo método SIMPLEC (Van Doormaal e Raithby (1984)).

Utiliza-se o arranjo de variáveis co-localizadas, onde todas as variáveis do problema são armazenadas no centro dos volumes de controle. Visando a elaboração de um programa

computacional bastante geral, foi utilizada uma formulação que resolve tanto problemas com fluidos compressíveis, onde a massa específica varia ponto a ponto, dependendo da pressão, como com fluidos incompressíveis, onde a massa específica mantém-se constante em todo o domínio. Foi utilizado o método MSI de nove pontos para solução do sistema de equações resultantes da discretização do modelo.

A malha utilizada no presente trabalho é similar à apresentada na Fig. 2, porém com maior número de pontos (30x30). Esta foi gerada através do método diferencial elíptico. Este método dá origem a coordenadas que apresentam um maior grau de uniformidade da malha, sendo possível concentrar a malha em regiões importantes (região de alimentação do ciclone) e dispersá-las em regiões menos importantes (saída inferior), tornando o programa mais veloz e eficiente, sem a necessidade de adaptações no corpo do programa computacional, como é discutido por Souza e Ulson de Souza (1999).

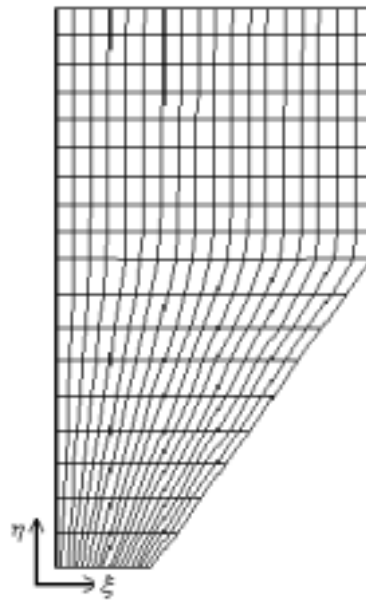


Figura 2. Malha computacional

As principais equações que descrevem este método elíptico de geração de malha são apresentadas em Thompson *et al.* (1974), através das Eqs. (8) a (10).

$$\nabla^2 \xi = P(\xi, \eta) \quad (8)$$

$$\nabla^2 \eta = Q(\xi, \eta) \quad (9)$$

onde

$$P(\xi, \eta) = -\sum_{j=1}^N a_j \text{sign}(\xi - \xi_j) e^{-c_j |\xi - \xi_j|} - \sum_{i=1}^M b_i \text{sign}(\xi - \xi_i) e^{-d_i \{(\xi - \xi_i)^2 + (\eta - \eta_i)^2\}^{1/2}} \quad (10)$$

Tem-se uma equação análoga para $Q(\hat{\eta}, \hat{\zeta})$. Na Eq. (10), o coeficiente a_j atrai as linhas ξ para a linha $\hat{\eta}_j$, enquanto que o coeficiente b_i atrai as linhas ξ para o ponto (ξ_i, η_i) .

O código CFD foi desenvolvido utilizando-se a linguagem FORTRAN 90, sendo que para o processamento foi utilizado um microcomputador PENTIUM 2, 400 Mhz, com 128 Mb de memória RAM. A convergência foi alcançada num tempo médio de 75 minutos, para

uma malha 30 x 30, sendo o critério de convergência adotado de 10^{-5} nos componentes do vetor velocidade.

5. RESULTADOS

Visando a validação do algoritmo numérico, elaborado para a simulação do escoamento em ciclones, os resultados numéricos do presente trabalho são comparados com os resultados experimentais de Cremasco (1994), que possuem um intervalo de incerteza da ordem de 10 a 20 %, para o componente tangencial do vetor velocidade e da ordem de 50 %, para o componente axial do vetor velocidade.

A Fig. 3 apresenta o perfil radial de velocidade tangencial adimensional $V^* = v/v_{in}$, na posição axial $0,9632 m$. Nesta figura, pode-se observar que os resultados numéricos estão bem ajustados aos dados experimentais, sendo que o desvio obtido no valor do pico de velocidade, comparativamente aos dados experimentais, é de 16,2 %. Estes resultados só foram alcançados quando utilizou-se um modelo de turbulência anisotrópico, ou seja, um modelo que levasse em conta a baixa resistência ao escoamento tangencial frente ao radial e axial. Pode-se observar ainda que a função de parede apresentada por Patterson e Munz (1989, 1996), e aplicada neste trabalho, obtém ótimos resultados, com uma excelente predição da velocidade tangencial junto à parede do ciclone.

Um aspecto importante e que torna mais complexa a solução numérica dos ciclones é a reversão do escoamento ao longo da parede interna. Esta reversão pode ser observada na Fig. 4, onde é graficado o perfil de velocidade axial adimensional $W^* = w/v_{in}$ na altura $0,9632 m$. Os resultados obtidos neste trabalho apresentam o mesmo comportamento dos dados experimentais, porém quantitativamente existe uma diferença razoável; isto é devido provavelmente a uma subpredição da viscosidade turbulenta na direção radial e axial, que conduz por sua vez a velocidades axiais superiores às esperadas.

Os vetores velocidade compostos pelos componentes radiais e axiais são apresentados na Fig. 5. Nesta figura é possível visualizar a reversão do escoamento e a existência do fenômeno "upflow", bem como o comportamento do escoamento no interior do ciclone.

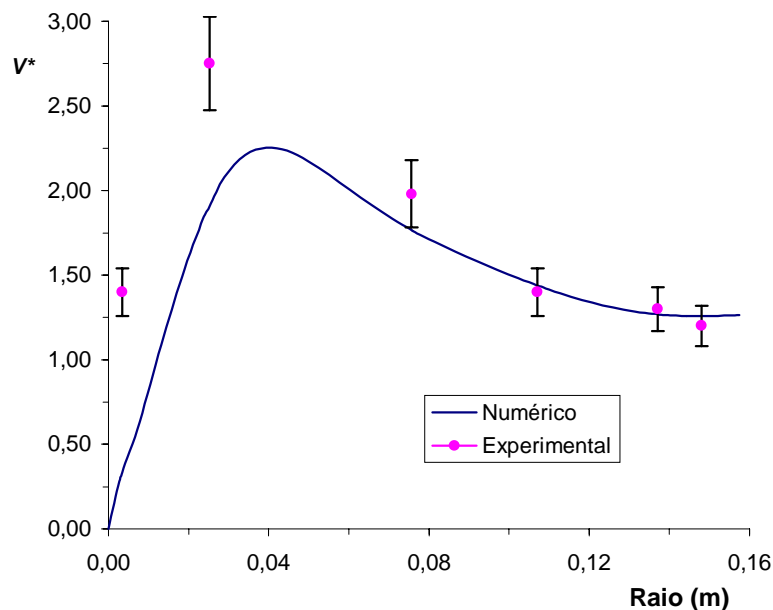


Figura 3. Perfil de velocidade tangencial adimensional, em $z = 0,9632m$

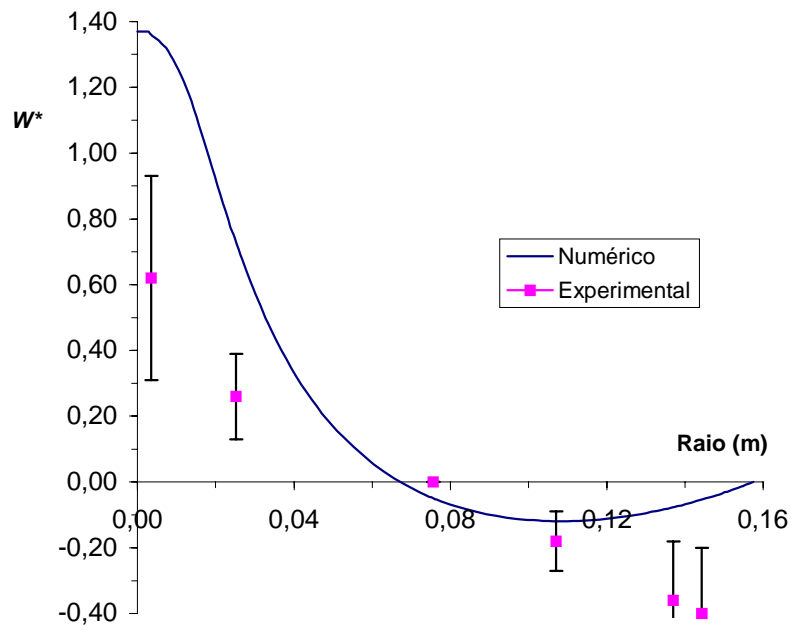


Figura 4. Perfil de velocidade axial adimensional, em $z = 0,9632m$

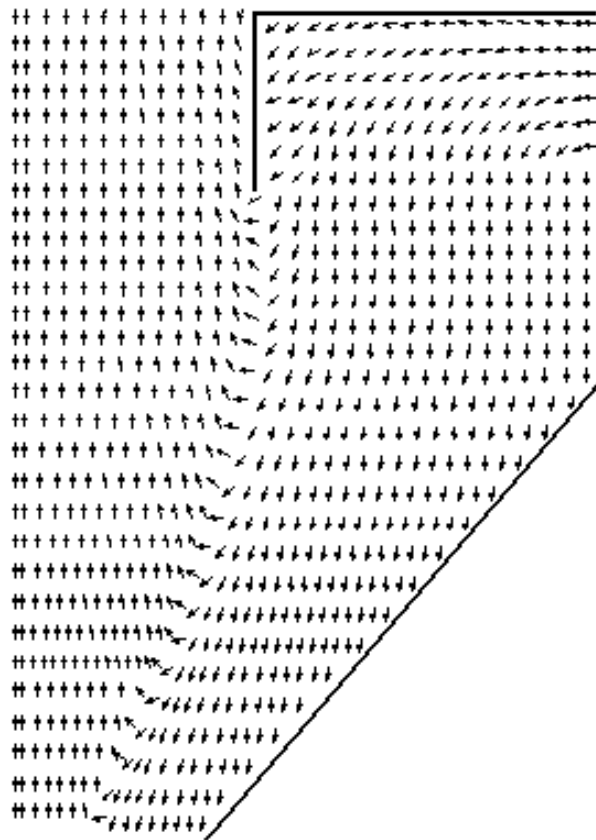


Figura 5. Vetores velocidade no interior do ciclone

6. CONCLUSÕES

O modelo matemático utilizado envolve a equação de conservação da quantidade de movimento e a equação da conservação da massa. Devido à natureza do escoamento estudado ser tipicamente turbulento, o modelo do comprimento de mistura de Prandtl foi acoplado ao modelo matemático para uma melhor descrição do fenômeno.

A formulação proposta para representar o fenômeno físico e a metodologia de solução empregada para o tratamento do modelo matemático mostram-se adequadas, permitindo reproduzir o fenômeno físico com boa precisão.

Quanto ao emprego das coordenadas generalizadas, verificou-se sua adequação ao problema, facilitando e aumentando a precisão da aplicação das condições de contorno em todas as fronteiras, bem como viabilizando a elaboração de um código numérico mais genérico, que permite o tratamento da solução de uma maior gama de problemas de Mecânica dos Fluidos, associado às diferentes geometrias de ciclones existentes.

Considerando a complexidade do presente escoamento, os resultados numéricos obtidos no presente trabalho apresentam boa concordância com os dados experimentais encontrados na literatura, permitindo prever fenômenos de preservação de vorticidade, reversão de escoamento, efeito do tipo "upflow" e o pico da velocidade tangencial com um desvio de 16,2 %, com relação aos dados experimentais.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq (Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico), pelo apoio concedido, e aos integrantes do LABSIN, Laboratório de Simulação Numérica de Sistemas Químicos da Universidade Federal de Santa Catarina.

REFERÊNCIAS

Creiasco, M. A. (1994), - "Estudo sobre o Escoamento Ar-Partículas em um Reator Ciclônico", Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil

Lilley, D.G. e Chigier, N. A. (1971), "Nonisotropic Turbulent Stress Distribution in Swirling Flows from Mean Value Distributions", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 14, 573 - 585

Maliska, C.R. (1995), "Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional: Fundamentos e Coordenadas Generalizadas", Ed. LTC, Rio de Janeiro.

Patterson e Munz (1989), "Cyclone Collection Efficiencies at Very High Temperature", *Canad. J. Chem. Eng.*, 67, 321 - 328.

Patterson e Munz (1996), "Gas and Particle Flow Patterns in Cyclones at Room and Elevated Temperature", *Canad. J. Chem. Eng.*, 74, 213 - 221.

Perez, J.O. (1987), "Simulação Numérica de Descargas Térmicas em Corpos d' Água Rasos de Geometria e Profundidade Variável", Tese de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Raithby, G.D. and Torrance, K.E. (1974), "Upstream-Weighted Differencing Schemes and their Application to Elliptic Problems Involving Fluid Flow", *Computers and Fluids*, 2, 191 - 206.

Souza, D.P. e Ulson de Souza, A.A. (1999), "Geração de Malhas para a Solução de Hidrociclones, Utilizando Método Elíptico", II ENPROMER, Universidade Federal de Santa Catarina, Anais em CD, Florianópolis.

Souza, D.P. (2000), "Aplicação das Equações Fundamentais para a Solução do Escoamento em Ciclones e Hidrociclones", Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis.

Thompson, J.F., Thames, F. C. and Master, W.C. (1974), "Automatic Numerical Generation of Body Fitted Curvilinear Coordinates System for field Containing any Number of Arbitrary Two Dimensional Bodies", Journal of Computational Physics, 15, 299 – 319.

Van Doormaal, J.P. and Raithby, G.D. (1984), "Enhancements of the SIMPLEC Methods for Predicting Incompressible Fluid Flows", Numerical Heat Transfer, 7, 147 - 163.

UTILIZATION OF THE FINITE VOLUME METHOD IN THE SOLUTION OF THE FLOW IN CYCLONES USING GENERALIZED COORDINATES

Dilênio P. de Souza - dilenio@labsin.ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina - Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, LABSIN - Laboratório de Simulação Numérica de Sistemas Químicos
CEP 88040-900 - Caixa Postal 476, Florianópolis, SC, Brasil

Henry F. Meier - meier@furb.rct-sc.br

Universidade Regional de Blumenau - Departamento de Engenharia Química, LFC – Laboratório de Fluidodinâmica Computacional
CEP 89010-971 - Caixa Postal 1507, Blumenau, SC, Brasil

Antonio A. Ulson de Souza - augusto@enq.ufsc.br *

Universidade Federal de Santa Catarina - Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, LABSIN - Laboratório de Simulação Numérica de Sistemas Químicos
CEP 88040-900 - Caixa Postal 476, Florianópolis – SC

***Abstract.** This work presents a study of the turbulent flow in cyclones using the Computational Fluid Dynamics techniques. The developed mathematical model is based on the conservation equations of the mass and momentum, in the conservative form, transformed for the generalized coordinates system. It is considered the turbulent, isothermal, monophasic flow. The domain discretization is made using the coordinate coincident with boundary of the physical problem, with a structured grid. The governing equations are treated with the technique of finite volumes, with co-located variables arrangement. For the pressure-velocity coupling, the method SIMPLEC is used. The results of the numerical model present good agreement when compared with the experimental data of the literature.*

Keywords: Cyclones, Computational Fluid Dynamics, Generalized Coordinates.

* To whom all correspondence should be addressed