

## INFLUÊNCIA DA FORMA GEOMÉTRICA DO DUTO DE ALIMENTAÇÃO DE UM CICLONE COMO SECADOR

### Fabiana Pimentel Macêdo Farias

Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem (LPFI)  
Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó – CEP 58109-970 – Campina Grande – PB – Brasil.  
[fabianap@oi.com.br](mailto:fabianap@oi.com.br)

### Antonio Gilson Barbosa de Lima

Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM), Laboratório Computacional de Térmica e Fluido (LCTF)  
Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó – CEP 58109-970 – Campina Grande – PB – Brasil.  
[gilson@dem.ufcg.edu.br](mailto:gilson@dem.ufcg.edu.br)

### Severino Rodrigues de Farias Neto

Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Unidade Acadêmica de Engenharia Química (UAEQ), Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem (LPFI)  
Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó – CEP 58109-970 – Campina Grande – PB – Brasil.  
[fariasn@deq.ufcg.edu.br](mailto:fariasn@deq.ufcg.edu.br)

**Resumo.** *Ciclones são dispositivos muito utilizados em processos químicos, em diferentes operações unitárias. Nos últimos anos, o ciclone tem sido investigado como secador. Este trabalho propõe avaliar a influência da seção de entrada do ciclone no processo de secagem do bagaço de cana-de-açúcar. O modelo matemático considerou escoamento tri-dimensional, turbulento e estacionário para a fase gasosa e o modelo Lagrangeano para as partículas. As equações diferenciais foram resolvidas numericamente pelo método dos volumes finitos, com esquema de interpolação UPWIND para os termos convectivos e o algoritmo SIMPLEC para o acoplamento pressão-velocidade. As simulações foram realizadas utilizando o código computacional CFX-3D. Observou-se o caráter tridimensional do escoamento gás-partícula no interior do ciclone. A cinética de secagem e a temperatura das partículas foram afetadas pela forma da entrada tangencial do ciclone. O ciclone com seção de entrada quadrada mostrou-se mais eficiente quando comparado com as seções retangulares vertical e horizontal.*

*Palavras chave:* ciclone, CFX, fluidodinâmica, secagem, bagaço-de-cana.

## 1. Introdução

Ciclones são dispositivos mecânicos simples usados há mais de cem anos em processos químicos industriais com o objetivo de separar/coletar sólidos e/ou líquidos suspensos em uma corrente gasosa (Corrêa, 2003). Sua popularidade se deve principalmente à sua simplicidade de construção, ausência de partes móveis reduzindo a necessidade de manutenção, capacidade de operar em condições severas de temperatura (até mais de 1300 K) e de pressão (desde 0,01 bar a 100 bar), e por possuir alta eficiência na remoção de partículas com diâmetros superiores a 5  $\mu\text{m}$  (Gomide, 1980; Meier, 1998; Salcedo e Pinho, 2003, Corrêa, 2003; Corrêa *et al.*, 2004; Noriler *et al.*, 2004). Apesar dessa simplicidade, os ciclones apresentam um comportamento fluidodinâmico muito complexo: presença de zonas de reversão de fluxo, regiões de recirculação, alta preservação do vórtice, alta intensidade turbilhonar, entre outros (Meier, 1998; Solero e Coghe, 2002, Corrêa, 2003; Noriler *et al.*, 2004).

Um ciclone convencional tem como princípio de funcionamento a injeção de um gás juntamente com partículas no interior do corpo cilíndrico através de uma entrada tangencial pela parte superior formando um movimento circular descendente e na forma de uma espiral. Ao atingir a seção cônica, o diâmetro do vórtice diminui e observa-se uma reversão do fluxo gasoso em um movimento circular ascendente em direção ao topo do equipamento. As partículas, no entanto, por apresentarem densidades superiores a do gás, são arrastadas pela corrente gasosa fazendo com que as mesmas se movam radialmente em direção à parede do ciclone. Neste ponto, elas são, igualmente, afetadas pela força gravitacional e pelo atrito forçando-as a deslizarem em direção a parte inferior do ciclone onde são coletadas. Outras definições de funcionamento foram descritas por diversos autores, dentre os quais podem ser citados: Pericleous (1987); Thorn (1998); Zhu e Lee (1999); Nebra *et al.* (2000); Salcedo e Pinho (2003); Vegini *et al.* (2003), Yalcin *et al.* (2003).

A complexidade da configuração do fluxo no interior do ciclone é decorrente do alto nível de turbulência e da tridimensionalidade do escoamento. As possíveis características transientes do movimento turbilhonar levaram a comunidade científica e industrial a realizar estudos teóricos e experimentais. Na maioria destes trabalhos são propostas modificações na geometria do ciclone e o desenvolvimento de modelos matemáticos ou empíricos que possibilitam melhorar a eficiência de coleta das partículas sólidas, reduzir a queda de pressão, aumentar o tempo de residência das partículas, entre outros (Pericleous, 1987; Nebra *et al.*, 2000; Solero e Coghe, 2002; Avci e Karagoz, 2003; Salcedo e Pinho, 2003).

Neste sentido, o presente trabalho se propõe avaliar a influência da forma do duto de alimentação do ciclone visando realizar a secagem do bagaço de cana-de-açúcar com alto teor de umidade. Este processo de secagem é de suma importância nas indústrias sucroalcooleiras, pois o bagaço é usado como fonte alternativa na produção de energia, a qual é aproveitada nas etapas dos processos de fabricação de açúcar e álcool, bem como se constitui em mais uma fonte de renda, já que a energia excedente produzida nas usinas é vendida para outros consumidores.

## 2. Definição do problema

O ciclone estudado foi o mesmo utilizado por Corrêa (2003), conforme pode ser observado na Fig. 1. Este aparato difere deste autor pela ausência do dispositivo de alimentação das partículas (alimentador Venturi) ilustrado na Fig.2, o qual era acoplado ao duto de entrada de gás/partícula do ciclone. Todavia, com o intuito de preservar a mesma distribuição de velocidade (gás/partícula), observada na seção reta do duto de alimentação, foi aplicada uma condição de contorno baseada nos dados experimentais disponibilizados por Corrêa (2003), conforme será explicitado mais adiante, no item 3.3.

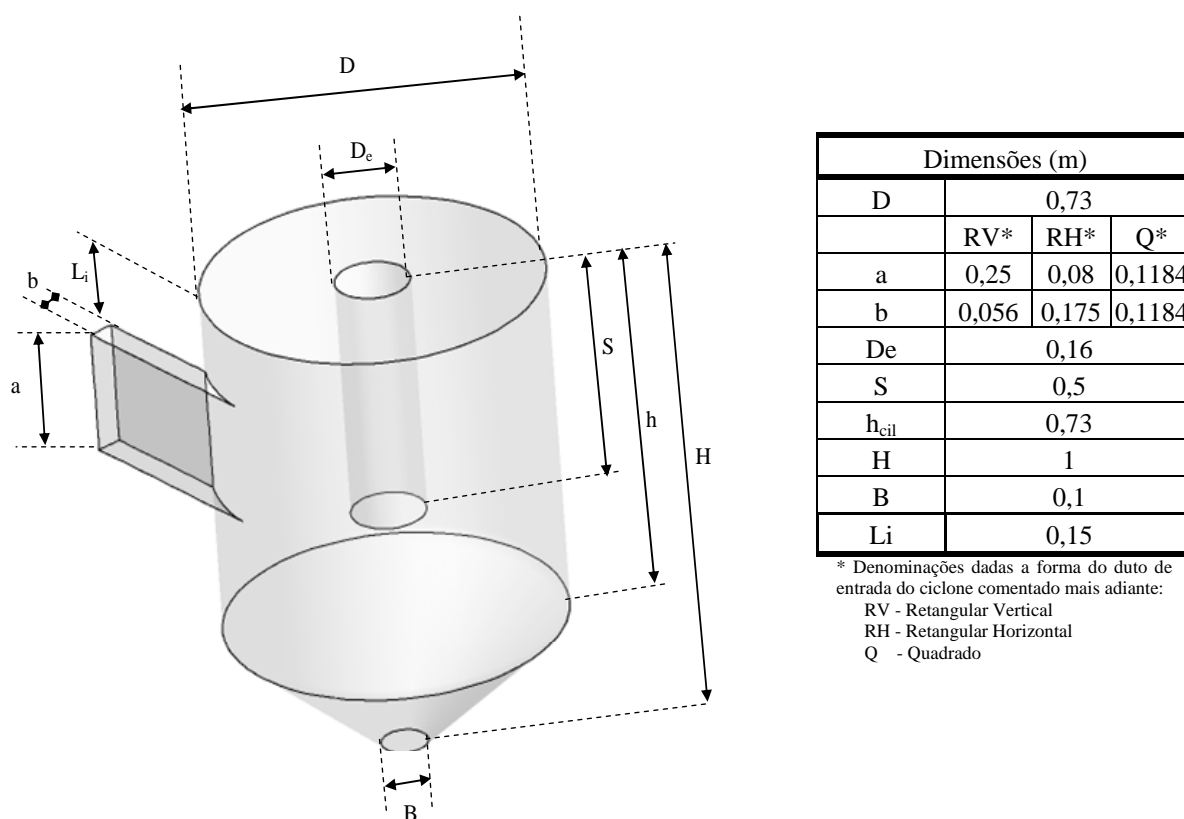


Figura 1 – Representação do ciclone como secador, com suas respectivas dimensões.

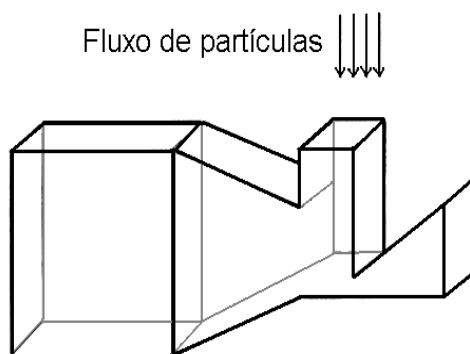


Figura 2 – Alimentador Venturi que é acoplado ao ciclone usado por Corrêa (2003).

### 3. Modelagem matemática

Uma compreensão e uma análise dos fenômenos envolvidos em um ciclone como secador conduz a definições específicas do modelo matemático disponibilizado no código comercial CFX 4.4, juntamente com as condições de contornos.

#### 3.1. Fase gasosa

Equação de momento linear:

$$\frac{\partial(\rho\vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{u}\vec{u}) = B + \nabla \cdot (\sigma - \rho\overline{\vec{u}'\vec{u}'}') \quad (1)$$

Onde é  $\vec{u}$  o vetor velocidade,  $\rho$  é a densidade do fluido,  $\sigma$  o tensor de cisalhamento, B a força corpo,  $\vec{u}'$  a flutuação da velocidade devido à turbulência, t o tempo e  $\rho\overline{\vec{u}'\vec{u}'}'$  o tensor de Reynolds.

Equação de energia térmica:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{u}T) = \nabla \cdot \left( \Gamma\nabla T - \rho\overline{\vec{u}'T'} \right) + S \quad (2)$$

Onde T é a temperatura,  $\Gamma$  o termo de transporte (difusividade) e S corresponde ao termo fonte.

Além destas equações foi igualmente utilizado o modelo o modelo k-ε padrão, que de acordo com o trabalho de Corrêa (2003) foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais, maiores detalhes deste modelo podem ser encontrados, por exemplo, em Ranade (2001); Blazek (2001); Rodi (1993).

#### 3.2. Fase particulada

Para se avaliar a fase particulada foi adotado o modelo de transporte de partícula Lagrangeano, no qual o fluxo total da fase particulada é modelado pelo traçado de um número pequeno de partículas através da fase contínua e as partículas são tratadas como se fossem arrastadas individualmente pelo gás.

A taxa de variação da velocidade da partícula é dada pela Segunda Lei do movimento de Newton, como segue:

$$m_p \cdot \frac{d\vec{u}_p}{dt} = F \quad (3)$$

Onde  $m_p$  é a massa da partícula,  $\vec{u}_p$  o vetor velocidade da partícula e F a força sobre a partícula, na qual sua principal componente é a força de arraste,  $F_D$ , exercida sobre a partícula esférica pela fase contínua, dada por:

$$F_D = \frac{1}{8} \cdot \pi \cdot d_p^2 \cdot \hat{f}_f \cdot \rho \cdot C_D \cdot |v_r| \cdot v_r \quad (4)$$

Onde o  $v_r$  é a velocidade relativa partícula-gás,  $d_p$  é o diâmetro da partícula.

Como as partículas do bagaço-de-cana têm em sua maioria partículas no formato cilíndrico foram introduzidos dois fatores de correção: um fator de área de seção transversal ( $\hat{f}_f$ ) na Eq. 4 e o fator de área superficial ( $\hat{e}_f$ ) na Eq. 9, definidos, respectivamente, pelas Eqs. 5 e 6.

$$\hat{f}_f = \frac{A_{pne}}{A_{pe}} \quad (5)$$

$$\hat{e}_f = \frac{As_{pe}}{As_{pne}} \quad (6)$$

Onde  $A_{pne}$  corresponde a área da seção transversal de uma partícula não-esférica de volume V,  $A_{pe}$  a área da seção transversal de uma partícula esférica de volume V,  $As_{pe}$  é a área superficial de uma partícula esférica de volume V e  $As_{pne}$  a área superficial de uma partícula não-esférica de volume V.

O coeficiente de arraste  $C_D$ , sendo dado por:

$$C_D = 24 \cdot (1 + 0.15 \cdot \text{Re}^{0.687}) / \text{Re} \quad (7)$$

Sendo  $\text{Re}$  o número de Reynolds da partícula, dado por:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot |v_r| \cdot d_p}{\mu} \quad (8)$$

Onde  $\rho$  e  $\mu$  são a densidade e viscosidade da fase gasosa, respectivamente.

Equação do transporte de massa entre a fase gasosa e as partículas:

$$\frac{d m_p}{dt} = \pi \cdot d_p \cdot \hat{e}_f \cdot D \cdot Sh \cdot \frac{M_v}{M_G} \cdot \log\left(\frac{1-X}{1-X_G}\right) \quad (9)$$

Onde  $Sh$  é o número de Sherwood,  $D$  é a difusividade da água na fase gasosa,  $M_v$  é o peso molecular do vapor,  $M_G$  peso molecular do gás, enquanto  $X$  e  $X_G$  são as frações molares da partícula e da fase gás, respectivamente. O modelo assume que a fração molar da partícula é igual ao teor de umidade da partícula ( $M$ ) ao longo do processo e  $X_G$  é a umidade absoluta do gás.

A equação da taxa de variação da temperatura na partícula como sendo:

$$\Sigma(m_c \cdot C_p) \cdot \frac{d T_p}{dt} = \frac{Nu \cdot k}{d_p} 4\pi \left(\frac{d_p}{2}\right)^2 (T_G - T_p) + \Sigma \frac{dm_c}{dt} h_{fg} \quad (10)$$

Onde  $m_c$  é a massa do constituinte na partícula,  $Nu$  número de Nusselt,  $k$  a condutividade térmica,  $h_{fg}$  calor latente de vaporização,  $T_G$  e  $T_p$  temperaturas do gás e da partícula, respectivamente.

Vale salientar que neste trabalho adotou-se o modelo concentrado para a partícula. Isto quer dizer que foi suposto que a umidade e a temperatura apresentavam valores iguais em todos os pontos do sólido, desprezando a resistência interna à transferência de massa e calor, quando comparada à resistência externa.

### 3.3. Condições de contorno

Foram adotadas e aplicadas as seguintes condições de contorno para o ciclone ilustrado na Fig. 1:

- Condição de não-deslizamento – todas as componentes de velocidade da fase gasosa foram consideradas nulas nas paredes internas do ciclone;
- Condição de saída – nas saídas, inferior e superior, foram adotadas condições de pressão atmosférica;
- Condição de entrada – o perfil de velocidade da mistura gás-partícula na direção  $x$  na seção de entrada no duto de alimentação (Fig. 3) foi obtido por meio de um ajuste, usando o método dos mínimos quadrados, de um polinômio de grau 6 (seis) aos dados experimentais, disponibilizado no trabalho de Corrêa (2003), da mistura ao passar pelo alimentador Venturi, Fig. 2. As componentes nas direções  $y$  e  $z$  foram assumidas nulas. As partículas, por sua vez, entravam no ciclone com uma componente de velocidade na direção  $x$  igual 1 m/s, e nula para as componentes em  $y$  e  $z$ . A temperatura inicial do gás foi de 489 K e para as partículas de 303,6 K. A umidade relativa do gás 3,41.
- Foi adotada a condição de colisão elástica para as partículas junto à parede.

### 4. Modelagem numérica

As soluções numéricas do modelo matemático foram obtidas por meio do software CFX-4.4, o qual usa o método dos volumes finitos para a discretização das equações diferenciais parciais Maliska (1994); Fortuna (2000). O esquema de interpolação usado foi o “upwind” para os termos convectivos e para o acoplamento pressão-velocidade foi empregado o algoritmo SIMPLC. A malha foi gerada por meio de multi-blocos, maiores detalhes desta técnica pode ser encontrada Farias (2006).

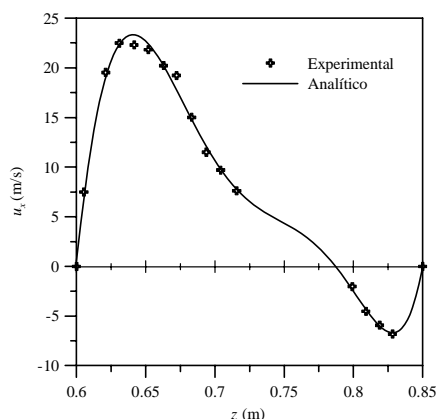


Figura 3 – Perfil de velocidade gás-partícula adotado na seção reta do duto de alimentação do ciclone.

#### 4.1. Malha

Para gerar a malha do ciclone como secador no CFX foi necessário representar a geometria com auxílio da definição de pontos, curvas, superfícies e sólidos, em um espaço tri-dimensional, descrevendo o seu tamanho e o seu formato em duas etapas principais: a primeira, confecção da geometria do ciclone e a segunda a geração da malha propriamente dita.

Foram desenvolvidas três malhas representativas do ciclone, as quais se diferenciam em relação à geometria do duto de alimentação do ciclone, representados respectivamente na Fig. 4. A denominação adotada no presente trabalho, para cada uma das malhas, está diretamente relacionada com a forma do duto de alimentação, ou seja, malha com duto de alimentação retangular vertical, Fig. 4a, retangular horizontal, Fig. 4b, e quadrada, Fig. 4c.

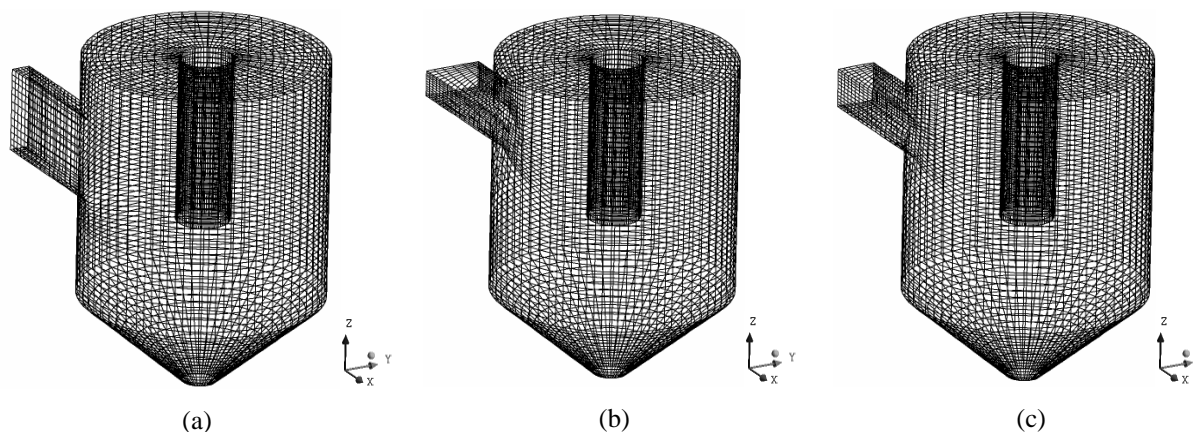


Figura 4 – Representação das malhas do ciclone com uma entrada (a) Retangular vertical; (b) Retangular horizontal; (c) Quadrado.

Com o intuito de garantir as mesmas características do perfil de velocidade na seção reta do duto de alimentação, para as três situações estudadas quadrada, retangular vertical e horizontal, foi assumido que:

1. As áreas da seção reta do duto de alimentação foram consideradas iguais a  $0,014 \text{ m}^2$  nas três configurações estudadas visando assegurar a mesma vazão nas três situações;
2. As grandezas das componentes de velocidade em cada posição  $z$  ao longo do duto de alimentação eram iguais as do duto de alimentação retangular vertical como ilustrada na Fig. 3.
3. Os diâmetros médios das partículas foram 6,35; 2,75; 0,84 e 0,42 mm com um teor de umidade inicial de 3,2 (b.s.).

#### 5. Resultados e Discussões

Com o intuito de compreender a influência do formato do duto de alimentação sobre o escoamento da fase gasosa estão representadas na Fig. 5 as linhas de fluxo no interior do ciclone, as quais partem de dois pontos próximos à primeira metade, partindo da base, do duto de alimentação. Estas figuras permitem, de uma maneira geral, evidenciar o comportamento em espiral ascendente na região central do ciclone e descendente nas proximidades das paredes

cilindro-cônica, conforme relatado na literatura, seja em ciclones ou hidrociclones (Cooper e Alley, 1986; Loyola *et al.*, 1996). Este tipo de comportamento ocorre igualmente em outros dispositivos munidos de uma entrada tangencial, como por exemplo: no escoamento turbilhonar laminar gerado por uma entrada tangencial de seção quadrada na base de um cilindro vertical (Bottaro *et al.*, 1991); no escoamento anular não estabelecido do tipo turbilhonar decrescente induzido por uma entrada tangencial na base de um espaço anular entre dois cilindros verticais (Farias Neto *et al.*, 1998). Segundo estes autores o decréscimo da intensidade turbilhonar ao longo do corpo do dispositivo estudado pode está relacionado com os efeitos efetivos das componentes de velocidades axiais ( $u_z$ ) e das forças de atrito induzidas pelas paredes do dispositivo.

Ao se observar mais atentamente estas figuras, Fig. 5.a, 5.b e 5.c verificaram-se diferenças nas linhas de fluxo. Neste sentido destaca-se, portanto a Fig. 5.b, na qual é possível verificar que a corrente de fluido inicialmente ascende e rapidamente desce para, então, permanecer por certo período nas proximidades da base do duto de saída superior ou “vortex finder”. Este tipo de comportamento está diretamente relacionado com a forma do duto de alimentação, retangular horizontal, que pode gerar intensidades turbilhonares mais pronunciadas nesta região do que as outras configurações avaliadas, retangular vertical e quadrada, representadas pelas Figuras 5.a e 5.c, respectivamente.

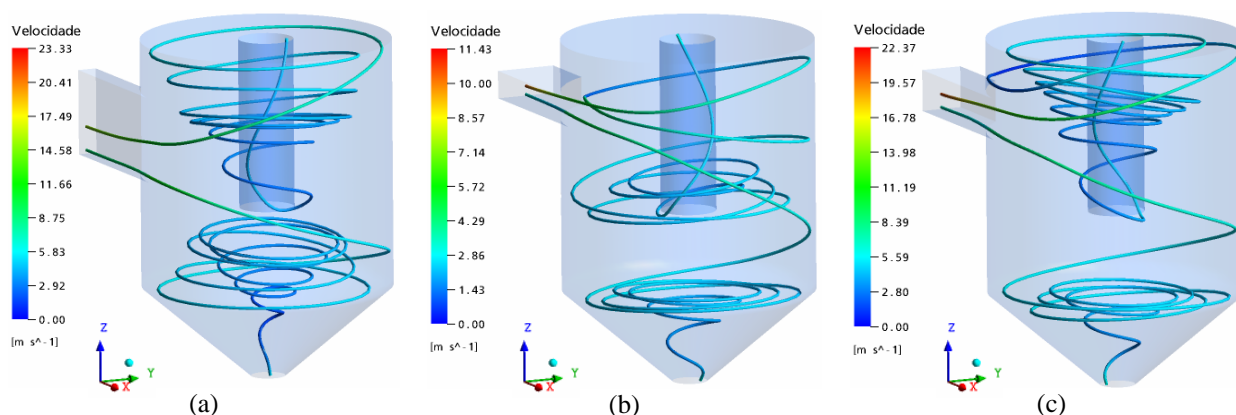


Figura 5 – Representação das linhas de fluxo do ciclone com uma entrada (a) Retangular vertical; (b) Retangular horizontal; (c) Quadrado.

A Figura 6 ilustra a distribuição de pressão sobre as superfícies externas do ciclone como secador. Este campo de pressão representa as forças que o fluido exerce sobre as paredes do ciclone, induzidas pelo fluxo de fluido que entra pela entrada tangencial, por unidade de área. Observa-se, de uma maneira geral, que a distribuição de pressão se mantém praticamente uniforme ao longo de toda a parede do cilindro, com exceção da região imediatamente após o duto de entrada. Nesta região se observa uma zona que é severamente castigada pelo choque direto das partículas e do gás, onde se observa valores mais expressivos da pressão, o que pode propiciar a remoção de partículas das paredes provocando, assim, um desgaste das paredes do ciclone. Portanto, esta região é crucial no projeto deste tipo de equipamento, principalmente quando se falar de partícula muito abrasiva (Zughbi *et al.*, 1991; Molerus e Glückler, 1996). Todavia, esta distribuição é mais evidenciada para o ciclone munido de uma entrada retangular horizontal, Fig. 6.b. Uma possível explicação para esta situação seria a desconcentração da corrente de gás-partícula, ao entrar no ciclone, próxima a parede cilíndrica.

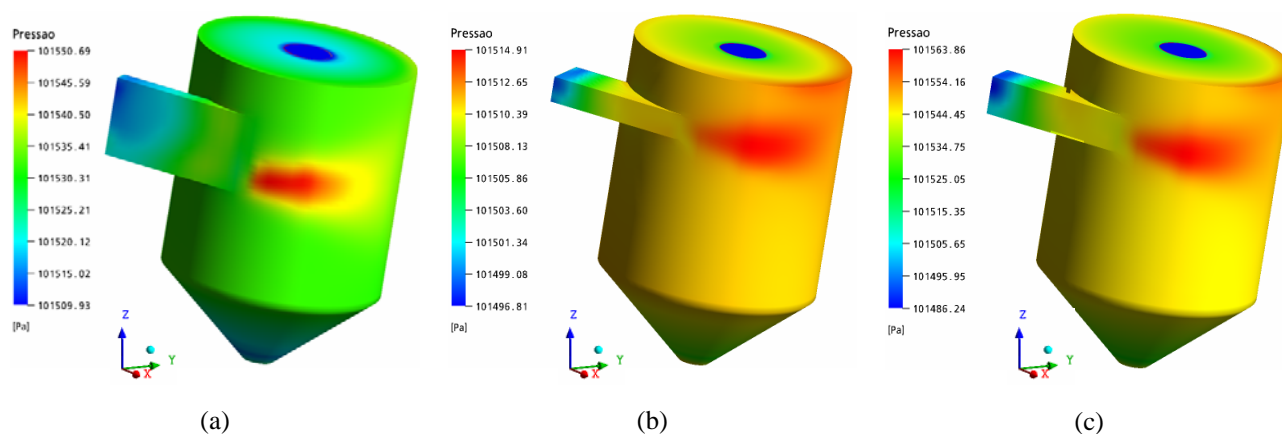


Figura 6 – Representação do campo de pressão sobre as superfícies externas do ciclone com uma entrada (a) Retangular vertical; (b) Retangular horizontal; (c) Quadrado.

A Figura 7 ilustra o mapeamento da pressão sobre o plano YZ passando pelo eixo do ciclone, para as diferentes formas do duto de alimentação. Observa-se, de uma maneira geral, um comportamento similar no campo de pressão, onde as regiões de altas pressões estão próximas à parede cilíndrica e as de menor se encontram no interior do tubo de saída do gás, proporcionando uma queda de pressão de 39,16 Pa, 13,01 Pa e 54,40 Pa, para os dutos de alimentação retangulares, vertical e horizontal, e quadrado, respectivamente. Deve-se destacar, ainda, outra zona de baixa pressão, próxima ao eixo de simetria. Este fato é decorrente da reversão do escoamento do gás que ocorre nas proximidades da interface da região cilíndrica e cônica.

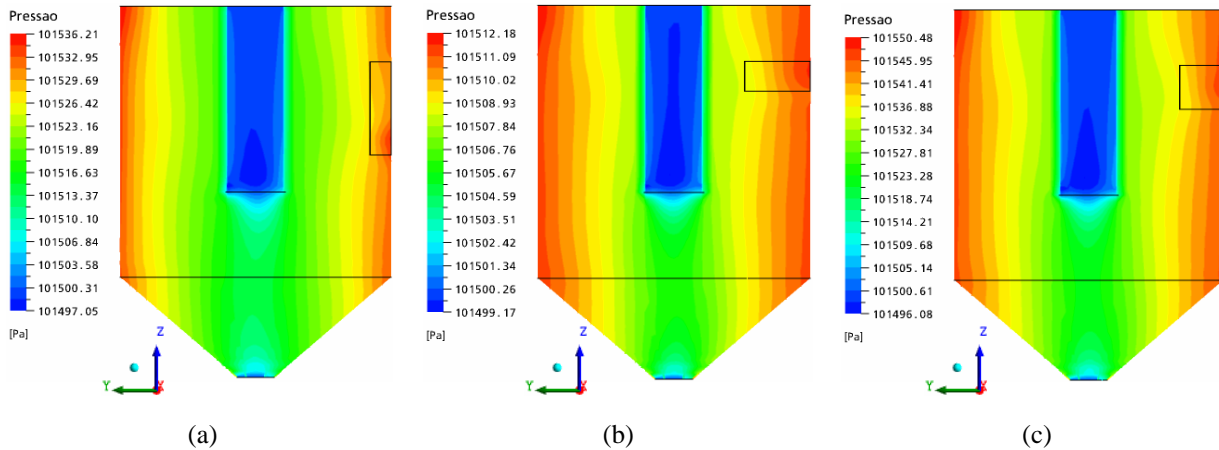


Figura 7 – Representação do campo de pressão sobre o plano YZ passando no eixo central do ciclone com uma entrada (a) Retangular vertical; (b) Retangular horizontal; (c) Quadrado.

No que se refere ao transporte de massa e com o objetivo de mostrar a influência da forma do duto de alimentação sobre o processo de secagem estão representados sobre as Fig. 8 a 10 o comportamento da temperatura, o diâmetro e o teor de umidade das partículas com diâmetro inicial iguais a 6,35 mm. Observa-se claramente na Fig. 8 que, durante o período de indução, a forma do duto de alimentação não influencia diretamente na temperatura da partícula. Após este período, a temperatura das partículas passa a sofrer certa influência do duto de entrada, em especial, para o caso do duto retangular horizontal. Este fato pode estar relacionado com a intensidade turbilhonar está mais distribuída ao longo do raio do ciclone, diferentemente do que fora observado para os outros formatos, quadrado e retangular vertical.

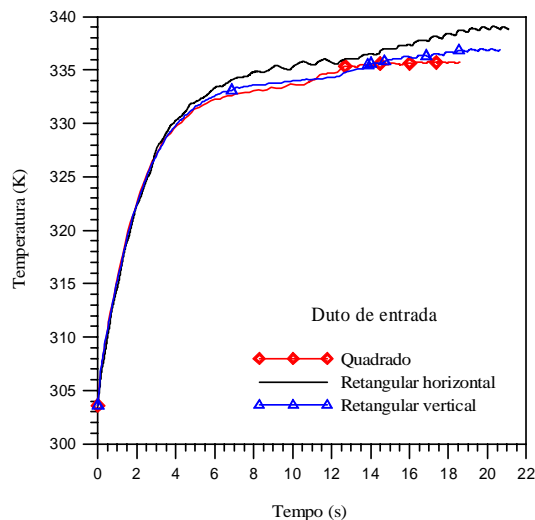


Figura 8 - Influência do duto de entrada na temperatura das partículas de diâmetro de 6,35 mm em função do tempo de residência.

De maneira análoga, foi analisada a influência do formato do duto de entrada sobre o teor de umidade e o encolhimento das partículas mostradas nas Fig. 9 e 10. Constatou-se que, para a partícula de 6,36 mm, as taxas de secagem e de encolhimento obtidas, durante o processo de secagem no ciclone com duto de alimentação retangular horizontal, foram inferiores àquelas obtidas para os dutos quadrado e retangular vertical. O duto quadrado apresentou melhores resultados que os demais, do ponto de vista de secagem.



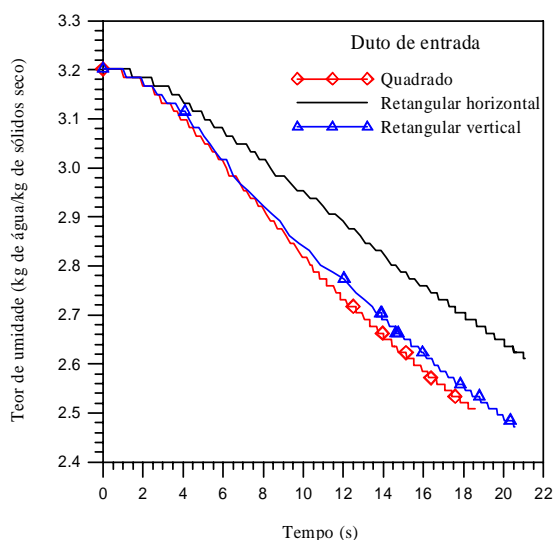


Figura 9 - Influência do duto no teor de umidade das partículas de diâmetro de 6,35 mm em função do tempo de residência.

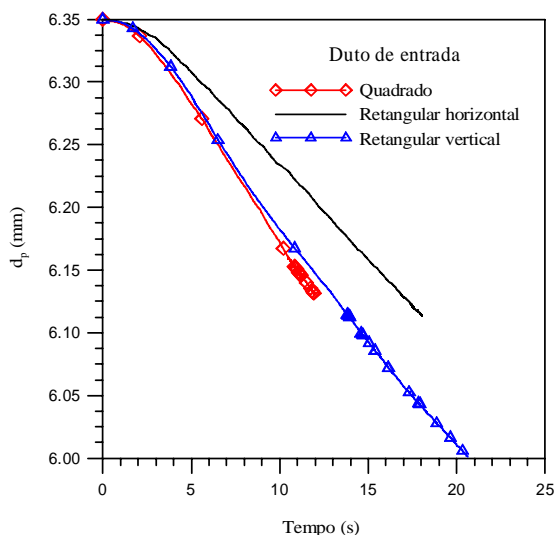


Figura 10 - Influência do duto de entrada no diâmetro das partículas de 6,35 mm em função do tempo de residência.

## 5. Conclusões

Com os resultados numéricos da simulação de secagem do bagaço-de-cana em ciclones pode-se concluir que:

1. Foi possível constatar, com auxílio das linhas de fluxo, que o escoamento do gás-partícula no interior do ciclone apresenta um caráter fortemente tridimensional.
2. Os resultados numéricos obtidos para o ciclone munido de um duto de alimentação do tipo retangular vertical foi a que apresentou valores mais expressivos da pressão e se apresentou mais susceptível ao desgaste na região imediatamente após a entrada do fluido-partícula da parede cilíndrica a qual é severamente castigada pelo choque direto das partículas e do gás.
3. Os resultados das simulações numéricas mostraram que as formas do duto de alimentação tiveram uma influência considerável tanto no comportamento hidrodinâmico quanto no processo de secagem.
4. O duto de alimentação com uma forma quadrada do mostrou-se mais eficiente na secagem do bagaço-de-cana quando comparado com o duto de seção retangular vertical ou retangular horizontal.



## 5. Agradecimentos

Os autores agradecem a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), ao CNPq, a ANP, a FINEP, ao CTPETRO, ao CT BRASIL, a FAPESP e a CAPES pelo o apoio na realização deste trabalho.

## 5. Referências bibliográficas

- Avci, A. e Karagoz, I., 2003, "Effects of Flow And Geometrical Parameters on The Collection Efficiency in Cyclone Separators", *Journal Aerosol Science*, Vol. 34, pp. 937-955.
- Blazek, J., 2001, "Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications", ELSEVIER SCIENCE Ltda, Netherlands.
- Bottaro, A., Ryhming, I. L., Wehrli, M. B., Rys, F. S. e Rys, P., 1991, "Laminar Swirling Flow and Vortex Breakdown an a Pipe", *Computers Methods in Appl. Mech. Eng.*, Vol. 89, pp. 41-57.
- Cooper, C. D., Alley, F. C., "Air Pollution Control- a Design Approach", <http://engineering.dartmouth.edu/~cushman/courses/engs37/A2-Cyclone-Theory.pdf>, acessado em .05/03/2004
- Corrêa, J. L. G., 2003, "Discussão de Parâmetros de Projeto de Secadores Ciclônicos", Tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, SP, Brasil.
- Corrêa, J. L. G., Graminho, D. R., Silva, M. A. e Nebra, S. A., 2004, "The Cyclone Dryer – a Numerical and Experimental Analysis of the Influence of Geometry on Averege Particle Residence Time", *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 21, No.01, pp. 103-112.
- Farias Neto, S.R., Legentilhomme, P. and Legrand, J., 1998, "Finite-Element Simulation of Laminar Swirling Decaying Flow Induced by Means of a Tangential Inlet in an Annulus", *Comput. Methods Appl. Mech., Eng.*, Vol. 165, pp 189-213
- Farias, F.P.M., 2006, "Estudo Teórico da Termofluidodinâmica em Secadores Ciclônicos", Tese de doutorado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.
- Fortuna, A. O., 2000, "Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos", Editora da Univ. de São Paulo, SP, Brasil.
- Gomide, R., 1980, "Operações Unitárias: Separações Mecânicas", 3º Volume, São Paulo, Brasil.
- Loyola, N., Tolman, S., Liang, L. Kennedy, M. e Johnson, D. J., 1996, "Cyclone Separators", [www.wsu.edu/~gmhyde/433\\_web\\_pages/cyclones/CycloneRptTeam3.html](http://www.wsu.edu/~gmhyde/433_web_pages/cyclones/CycloneRptTeam3.html) acessado em 05/03/2004
- Maliska, C. R., 1995, "Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional – Fundamentos e Coordenadas Generalizadas", LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Meier, H. F., 1998, "Modelagem Fenomenológica e Simulação Bidimensional de Ciclones por Técnicas da Fluidodinâmica Computacional", Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, SP, Brasil.
- Molerus, O. e Glückler, M., 1996, "Development of a Cyclone Separator with New Desing", *Powder Technology*, Vol. 86, pp. 37-40.
- Noriler, D., Vegini, A. A., Soares, C., Barros, A. A. C., Meier, H. F. e Mori, M., 2004, "A New Role for Reduction in Pressure Drop in Cyclones Using Fluid Dynamics Techniques", *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 21, No 1, pp. 93-101.
- Pericleous, K. A., 1987, "Mathematical Simulation of Hydrocyclones", *Appl. Math. Modelling*, Vol. 11, pp.242-255.
- Ranade, V.V., 2002, "Computational Flow Modeling for Chemical Reactor Engineering", Academic Press, Bath, Great Britain.
- Rodi, Wolfgang, "Turbulence Models and Their Application in Hydraulics-a State of The Art Review", Monograph Series, Terceira edição Rotterdam, Países Baixos (1993).
- Salcedo R. L. e Pinho, M. J., 2003, "Pilot- and Industrial-Scale Experimental Investigation of Numerically Optimized Cyclones", *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 42, No. 1, pp. 145-154.
- Solero, G. e Coghe, A., 2002, "Experimental Fluid Dynamic Characterization of A Cyclone Chamber", *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 27, pp. 87-96.
- Vegini, A. A., Meir, H. F., Mori, M., 2003, "Design of Cyclones by Using CFD Techniques", XXIV CILAMCE, Ouro Preto, Minas Gerais.
- Yalcin, T., Kaukolin E. e Byers A., 2003, "Axial Inlet Cyclone for Mineral Processing Applications", *Minerals Engineering*, Vol. 16, pp. 1375-1381.
- Zhu, Y. e Lee, W., 1999, "Experimental Study on Small Cyclones Operating at High Flowrates", *J. Aerosol Sci.*, Vol. 30, No. 10, pp. 1303-1315.
- Zughbi, H. D., Schwarz, M. P., Turner, W. J., Hutton, W., 1991, "Numerical and Experimental Investigations of Wear in Heavy Medium Cyclones", *Minerals Engineering*, Vol. 4, No. 3/4, pp. 245-262.

## **INFLUENCE OF THE GEOMETRIC FORM OF THE DUCT OF FEEDING OF A CYCLONE AS DRYING**

### **Fabiana Pimentel Macêdo Farias**

Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem (LPFI)  
Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó – CEP 58109-970 – Campina Grande – PB – Brasil.  
[fabianap@oi.com.br](mailto:fabianap@oi.com.br)

### **Antonio Gilson Barbosa de Lima**

Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM), Laboratório Computacional de Térmica e Fluido (LCTF)  
Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó – CEP 58109-970 – Campina Grande – PB – Brasil.  
[gilson@dem.ufcg.edu.br](mailto:gilson@dem.ufcg.edu.br)

### **Severino Rodrigues de Farias Neto**

Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Unidade Acadêmica de Engenharia Química (UAEQ), Laboratório de Pesquisa em Fluidodinâmica e Imagem (LPFI)  
Av. Aprígio Veloso, 882, Bodocongó – CEP 58109-970 – Campina Grande – PB – Brasil.  
[fariasn@deq.ufcg.edu.br](mailto:fariasn@deq.ufcg.edu.br)

### **Abstract**

Cyclones are equipments very used in chemical processes, in several units operations. In recent years, the cyclone has been investigated as dryer. This work proposes to investigate the influence of inlet section of the cyclone in the process of drying of the sugar cane bagasse. The mathematical model considers three-dimensional, turbulent and stationary flow for gas phase, and the Lagrange model for particles. The governing equations were solved numerically by the finite-volumes method, using the UPWIND interpolation scheme for the convective terms and the algorithm SIMPLEC for pressure-velocity coupling were used. Simulations had been carried out through using computational code CFX-3D. The three-dimensional gas-particle flow inside the cyclone, recirculation zones and inversion flow, was verified. It was verified that the kinetic drying e temperature of the particles are affected by form the tangential inlet of the cyclone. These results as compared with experimental data had presented good approach. Cyclone with square inlet section is more efficient to dry, as compared with the ducts of vertical and horizontal rectangular section.

Keywords: Cyclone, CFX, Fluid Dynamic, drying, sugar cane bagasse.