

ESTUDO NUMÉRICO DO ESCOAMENTO EM CICLONE DE SEPARAÇÃO GÁSSÓLIDO EMPREGANDO FERRAMENTAS GRATUITAS

Gabriel Baioni e SILVA ¹; João Lameu SILVA JUNIOR²; Rejane Barbosa SANTOS³

RESUMO

Simulações numéricas do escoamento em ciclones de separação gás-sólido foram realizadas nesta pesquisa, através da técnica CFD, empregando-se pacotes computacionais gratuitos (Salome versão 7.5.1 e OpenFOAM versão 2.3.1). Dois casos com diferentes vazões mássicas da corrente gás-sólido foram simulados, onde observou-se que o modelo matemático empregado capturou a fluidodinâmica esperada do escoamento em um separador ciclônico.

INTRODUÇÃO

Segundo Pell *et al.* (2008), ciclones ou separadores ciclônicos são os equipamentos de separação fluido-partícula mais usados na indústria química. De maneira geral, uma corrente de gás transportando sólido particulado entra em uma câmara tangencialmente a um ou mais pontos, passando por uma mudança de direção curvilínea no escoamento, onde, a inércia das partículas faz com que estas tenham a tendência a se mover no sentido da parede do equipamento, induzindo o particulado a um movimento helicoidal descendente através do ciclone até o fundo do equipamento, onde este é recuperado e pode voltar ao processo. Um esquema de um design clássico de ciclone tipo Stairmand é mostrado na Figura 1.

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Câmpus Pouso Alegre. Pouso Alegre /MG - E-mail gabrielbaioni@hotmail.com

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Câmpus Pouso Alegre. Pouso Alegre /MG. E-mail joao.lameu@ifsuldeminas.edu.br

³ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Câmpus Pouso Alegre. Pouso Alegre /MG. E-mail rejane.santos@ifsuldeminas.edu.br

Os ciclones são compostos por quatro partes principais, indicadas na Figura 1, e descritas, de modo geral conforme Dias (2009) como: Entrada da corrente: seção tangencial ao corpo do ciclone, por onde a corrente fluido-particulado entra no equipamento; Vortex Finder: seção cilíndrica no topo do equipamento, que tem a finalidade de capturar o gás limpo; Corpo do ciclone: seção cilíndrica onde a corrente é induzida ao movimento helicoidal; Seção cônica: seção com diminuição gradual da área em relação ao corpo do ciclone, promovendo uma aceleração das fases, a qual combinada a formação de uma região de baixa pressão, promove a inversão do escoamento da fase gasosa, a qual segue em direção ascendente para o *vortex finder*, e as partículas seguem em movimento descendente, devido também a ação gravitacional, sendo coletadas no fundo do equipamento.

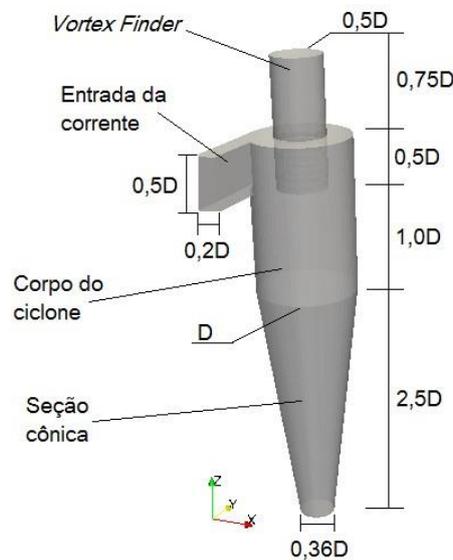


Figura 1. Geometria do ciclone tipo Stairmand, construída com base em Dias (2009).

Ciclones são objetivo de diversos estudos de otimização devido a questões, tanto econômicas, como por exemplo, o aumento da eficiência de coleta de partículas, geralmente catalisadores químicos, os quais representam grande parte dos custos do processo químico, quanto ambientais, devido as metas de diminuição da emissão de particulado na atmosfera.

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Câmpus Pouso Alegre. Pouso Alegre /MG - E-mail gabrielbaioni@hotmail.com

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Câmpus Pouso Alegre. Pouso Alegre /MG. E-mail joao.lameu@ifsuldeminas.edu.br

³ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Câmpus Pouso Alegre. Pouso Alegre /MG. E-mail rejane.santos@ifsuldeminas.edu.br

MATERIAL E MÉTODOS

Para o desenvolvimento das simulações numéricas, um notebook Dell Inspiron 14-2640, com processador Intel Core i5 de 2,4GHz. 6GB de memória RAM e 1TB de HD, com sistema operacional Linux Ubuntu 14.04 de 64 bits, fornecido pelo Núcleo Institucional de Pesquisa e Extensão do IFSULDEMINAS – Campus Pouso Alegre, foi usado.

A técnica Fluidodinâmica Computacional (CFD) foi usada nesta pesquisa. Esta é dividida em três etapas principais conforme a Figura 2. Os pacotes gratuitos Salome da OpenCascade (Etapas 1 e 2) e OpenFOAM da ESI Group e o pósprocessador Paraview da Kitware (Etapa 3) foram usados no desenvolvimento deste trabalho. O *solver* empregado (OpenFOAM) é baseado no Método dos Volumes Finitos, o qual apresenta como principal vantagem no estudo de sistemas com escoamento a conservação exata das propriedades de transporte.

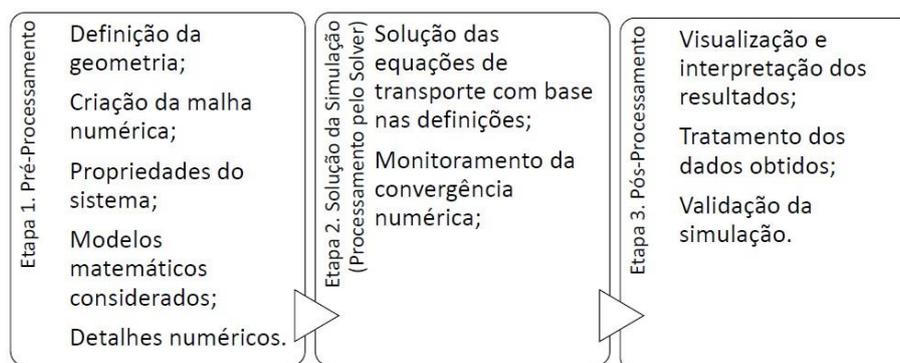


Figura 2. Etapas envolvidas em estudos da técnica Fluidodinâmica Computacional.

Esta pesquisa encontra-se nas etapas iniciais, e neste estágio, dois casos de estudo foram realizados visando um melhor entendimento sobre o escoamento em estudo, bem como sobre a técnica CFD e um conhecimento do pacote computacional usado.

Tabela 1. Condições operacionais dos casos simulados.

Caso	Velocidade de Entrada das Fases (m/s)	Vazão Mássica de Particulado (kg/s)
A	6	1,575
B	12	3,150

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Câmpus Pouso Alegre. Pouso Alegre /MG - E-mail gabrielbaioni@hotmail.com

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Câmpus Pouso Alegre. Pouso Alegre /MG. E-mail joao.lameu@ifsuldeminas.edu.br

³ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Câmpus Pouso Alegre. Pouso Alegre /MG. E-mail rejane.santos@ifsuldeminas.edu.br

Na solução dos casos simulados o *solver twoPhaseEulerFoam* foi empregado (OPENFOAM, 2014). Este solver é próprio para o escoamento bifásico, sendo uma das fases particulada, e parte da abordagem Euleriana, solucionando os balanços de massa, *momentum* e energia térmica. A interação entre as fases devido ao arraste fluido-partícula foi considerado pelo modelo clássico de Gidaspow (1994), que considera regiões com diferentes concentrações de sólido particulado, além disso, a interação entre partículas sólidas foi considerada pela teoria cinética do escoamento granular, bem como, a turbulência da fase contínua (gás), pelo modelo clássico *k-epsilon*.

A geometria empregada nas simulações tem como base as dimensões usadas no trabalho de Dias (2009), onde $D = 0,205\text{m}$, para a geometria do ciclone Stairmand. Para cada caso de estudo, 5s de simulação transiente foram resolvidos em aproximadamente 15 horas de simulação, utilizando-se um passo de tempo de $0,00025\text{s}$, visando manter a solução numérica estável. A malha numérica usada consiste em aproximadamente 60000 volumes de controle, onde as equações de transporte são discretizadas e solucionadas pelo método dos volumes finitos. As condições de contorno empregadas nas simulações foram: entrada – corrente de gás contendo 2,5% de sólido em volume, na velocidade específica de cada caso; saída de gás (topo) e saída de partículas (fundo) – abertas para pressão atmosférica; parede – não deslizamento para a fase gás e deslizamento livre para a fase sólida.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 3-5 mostram os resultados obtidos nas simulações. Pelas Figuras 3 e 4 observa-se um comportamento similar do padrão de escoamento no ciclone, variando apenas as magnitudes das velocidades, desde que condições operacionais diferentes foram consideradas nos casos A e B. Para ambos os casos, as linhas de corrente para a fase gasosa (Figuras 3(a) e 4(a)) mostram o comportamento esperado da corrente fluida no equipamento, onde uma parte do gás acompanha as partículas até a saída no fundo do ciclone, enquanto que, a outra fração de gás sobe devido a inversão do escoamento, na região próxima ao *vortex finder*, correspondente ao final da seção cilíndrica e início da seção cônica (regiões descritas na Figura 1).

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Câmpus Pouso Alegre. Pouso Alegre /MG - E-mail gabrielbaioni@hotmail.com

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Câmpus Pouso Alegre. Pouso Alegre /MG. E-mail joao.lameu@ifsuldeminas.edu.br

³ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Câmpus Pouso Alegre. Pouso Alegre /MG. E-mail rejane.santos@ifsuldeminas.edu.br

Observa-se também nas Figuras 3 e 4, as regiões de máximo valor de cada componente da velocidade da fase gás. Para a componente U_x , isto ocorre logo na entrada da corrente no corpo do ciclone, onde a parede curva desta região induz o fluxo a iniciar o movimento helicoidal (Figuras 3(b) e 4(b)). Para o caso A, a componente vertical da velocidade, U_z , atinge uma velocidade máxima descendente de aproximadamente 6m/s, enquanto que, o gás limpo sai pelo *vortex finder* com velocidade ascendente cerca de três vezes menos (Figura 3(d)). Já para o caso B os valores da velocidade vertical do gás são aproximadamente iguais (Figura 4(d)), tanto na saída do fundo, quanto no topo do ciclone, o que pode ser atribuído as maiores taxas de turbulência inerentes da condição operacional do caso B.

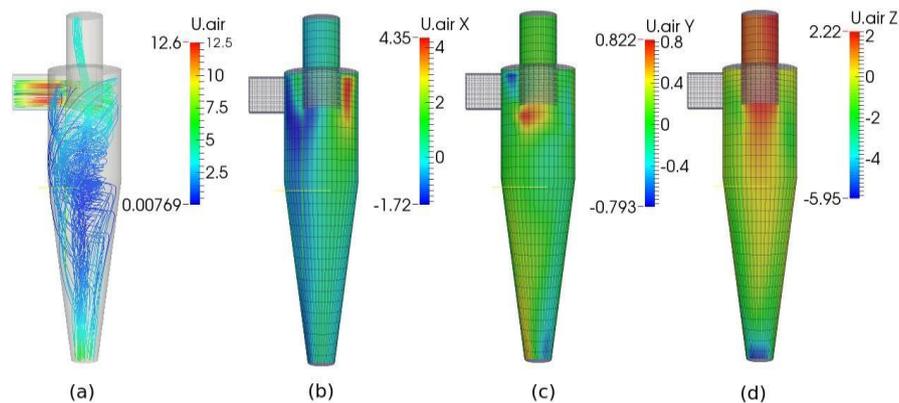


Figura 3. (a) Linhas de corrente para a magnitude da velocidade do ar; Componentes da velocidade do ar: (b) U_x ; (c) U_y ; (d) U_z – Caso A.

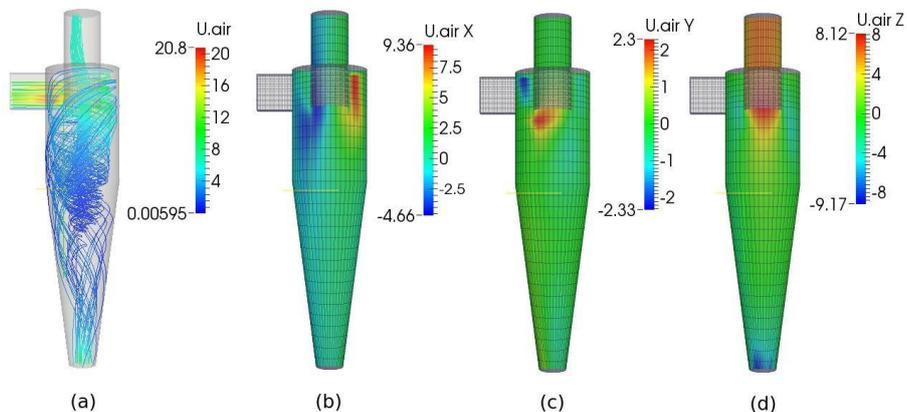


Figura 4. (a) Linhas de corrente para a magnitude da velocidade do ar; Componentes da velocidade do ar: (b) U_x ; (c) U_y ; (d) U_z – Caso B.

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Câmpus Pouso Alegre. Pouso Alegre /MG - E-mail gabrielbaioni@hotmail.com

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Câmpus Pouso Alegre. Pouso Alegre /MG. E-mail joao.lameu@ifsuldeminas.edu.br

³ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Câmpus Pouso Alegre. Pouso Alegre /MG. E-mail rejane.santos@ifsuldeminas.edu.br

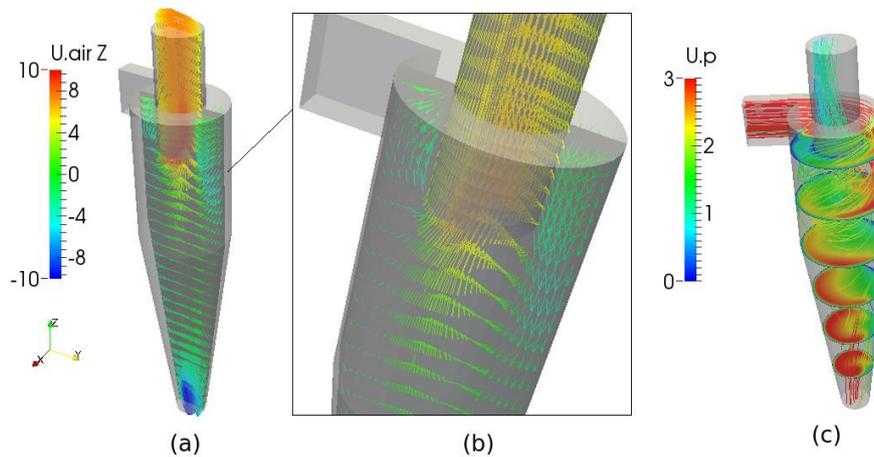


Figura 5. (a) Campo vetorial da componente U_z (vertical) da velocidade da fase gasosa; (b) detalhes da região de inversão do escoamento da corrente gasosa; (c) planos e linhas de corrente da velocidade da partícula sólida (U_p) – Caso B.

A Figura 5(a) e 5(b) apresenta detalhes da zona de reversão do escoamento da corrente de gás, induzida pela geometria do ciclone, devido a diminuição da área da seção transversal do corpo para a seção cônica do equipamento. Nota-se que o modelo matemático empregado conseguiu capturar este importante fenômeno relacionado à turbulência e a complexidade deste tipo de equipamento. A Figura 5(c) apresenta as linhas de corrente da fase sólida juntamente a planos da velocidade desta fase. Observa-se o movimento helicoidal da trajetória das partículas, as quais atingem a velocidade máxima nas regiões mais próximas da saída, devido a diminuição da área na seção cônica.

CONCLUSÕES

Simulações iniciais do escoamento gás-sólido foram realizadas usando *softwares* gratuitos de CFD (SALOME e OpenFOAM). Estudos mais detalhados ainda serão realizado nesta pesquisa, visando o melhor entendimento dos padrões complexos do escoamento em ciclones.

As simulações realizadas mostraram o potencial do pacote computacional aberto e gratuito OpenFOAM para aplicação no estudo de otimização de processos de separação gás-sólido, bem como em outros processos físico-químicos de interesse da Engenharia Química. Os padrões de escoamento esperados (movimento helicoidal e

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Câmpus Pouso Alegre. Pouso Alegre /MG - E-mail gabrielbaioni@hotmail.com

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Câmpus Pouso Alegre. Pouso Alegre /MG. E-mail joao.lameu@ifsuldeminas.edu.br

³ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Câmpus Pouso Alegre. Pouso Alegre /MG. E-mail rejane.santos@ifsuldeminas.edu.br

inversão do escoamento do gás) foram capturados pelo *so/ver* empregado, mesmo em condições de maiores cargas de sólidos.

REFERÊNCIAS

DIAS, D.B. **Avaliação de Técnicas de Fluidodinâmica Computacional em Ciclones**. 2009. 104p. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

GIDASPOW, D. **Multiphase flow and fluidization: Continuum and Kinetic Theory Descriptions**. Academic Press, 1994.

OPENFOAM User Guide: The Open Source CFD Toolbox, versão 2.3.1, OpenFOAM Foundation, 2014.

PELL, M; DUNSON, J.B. KNOWLTON, T.M. Gas-solid operation and equipment. In: GREEN, D; PERRY, R. **Perry's Chemical Engineer's Handbook**. 8th. Edition, McGraw-Hill Professional, 2008.

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Câmpus Pouso Alegre. Pouso Alegre /MG - E-mail gabrielbaioni@hotmail.com

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Câmpus Pouso Alegre. Pouso Alegre /MG. E-mail joao.lameu@ifsuldeminas.edu.br

³ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais – Câmpus Pouso Alegre. Pouso Alegre /MG. E-mail rejane.santos@ifsuldeminas.edu.br