

6º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO EM UM CICLONE DO VASO SEPARADOR DE UMA UNIDADE DE FCC UTILIZANDO FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

AUTORES:

Heloisa B. Bastos¹, João V. B. Alves, Andréa G. B. Freitas, Ricardo A. Medronho²

¹heloisabb@gmail.com, ²medronho@eq.ufrj.br

INSTITUIÇÃO:

Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 6º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 6º PDPETRO, realizado pela a Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 09 a 13 de outubro de 2011, em Florianópolis-SC. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 6ºPDPETRO.

SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO EM UM CICLONE DO VASO SEPARADOR DE UMA UNIDADE DE FCC UTILIZANDO FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Abstract

Fluid catalytic cracking is of great importance in a petroleum refinery. In this process, high molecular weight petroleum fractions, such as gas oil, are converted in more valuable products, like gasoline and LPG, in a fluidized bed reactor. In a FCC unit, cyclones promote the separation of catalyst from the cracking products, in the disengager vessel and between the catalyst and the flue gases in the regenerator. This way, cyclones are essential in a FCC unit. The aim of this work is to simulate the flow field inside a FCC disengager vessel cyclone using Computational Fluid Dynamics (CFD) and evaluate its performance through its efficiency.

Introdução

O processo de craqueamento catalítico em leito fluidizado, FCC (*Fluid Catalytic Cracking*), promove a quebra de moléculas maiores em moléculas de menor peso molecular, isto é, converte frações pesadas do petróleo (de baixo valor), como o gasóleo de vácuo, em derivados leves mais nobres, como a gasolina e o GLP. Por isso, o FCC é de grande importância dentro da indústria do refino de petróleo.

Em uma unidade de FCC, a carga se encontra com o catalisador na base do *riser*, onde é vaporizada e ascende por esse reator tubular, enquanto a reação de craqueamento se processa. Após a reação, é necessário separar os produtos do catalisador, o que ocorre em um vaso separador. Os ciclones são os principais responsáveis pela separação da mistura dos gases provenientes da reação ocorrida no *riser* com o catalisador. Os hidrocarbonetos gerados são encaminhados para uma unidade de fracionamento, enquanto que o catalisador vai para o retificador, onde os gases de hidrocarbonetos que foram arrastados pelo catalisador ou ficaram impregnados nele são removidos. O vapor de retificação com os gases removidos sobe, passa pelos ciclones e se junta à corrente dos gases de craqueamento, seguindo para a seção de fracionamento. O catalisador segue, então, para o regenerador, já que o subproduto coque se deposita na superfície do catalisador, inativando-o. Nessa unidade é feita a combustão do coque, gerando gases com grande energia térmica, que é aproveitada. Como os gases de combustão arrastam uma quantidade razoável de catalisador, no regenerador há um conjunto de ciclones (chamados de ciclones de segundo estágio) responsáveis por recuperar esse catalisador.

O desempenho de uma unidade de FCC impacta na economia da refinaria. Perdas de catalisador devem ser minimizadas durante sua circulação na unidade de FCC, visto que elas podem trazer sérias consequências econômicas, tais como, um considerável aumento de reposição (*make-up*) de catalisador no vaso separador; erosão severa nas bombas de circulação do produto de fundo da fracionadora do FCC (*slurry oil*); contaminação do *slurry-oil* por catalisador, diminuindo seu valor no mercado, e limpeza dos tanques de óleo pesado devido ao acúmulo de catalisador (NICCUM, 2010). Segundo SILVA (2007), na unidade de FCC da REDUC circulam, em média, 34 toneladas de catalisador por minuto. A unidade possui um inventário de 300 toneladas e o preço do catalisador é, em média, 2.200 dólares por tonelada. É por isso que um aumento na eficiência dos ciclones implica em economia.

O ciclone é um dos mais antigos e dos mais empregados equipamentos de separação sólido/gás, caracterizado por investimentos e custos operacionais baixos. Dotado de uma configuração geométrica capaz de realizar a separação através do campo centrífugo gerado pelo movimento

espiralado do gás em seu interior e da grande diferença de densidade existente entre o gás e as partículas, ele pode ser usado em altas temperaturas e pressões e para cargas com alta concentração de partículas. Na verdade, em alguns processos a altas temperatura (acima de 1000°C) e pressão (acima de 10 MPa), os ciclones são os únicos equipamentos de separação sólido/gás disponíveis, já que essas condições severas excluem a aplicação de outros equipamentos de separação de alta eficiência, como filtros e precipitadores eletrostáticos. Em vista disso, muitas companhias, universidades e organizações de pesquisa têm, ao longo dos anos, aumentado seus esforços para otimizar o *design* de ciclones para que se possa ter um equipamento de uso industrial com alta eficiência de separação para essas condições operacionais extremas (SUN, CHEN e SHI, 2005).

Com o desenvolvimento de computadores de alta performance e avanços nos algoritmos e técnicas numéricas, as ferramentas de fluidodinâmica computacional (CFD) estão sendo cada vez mais empregadas na resolução do escoamento do fluido e do comportamento da partícula. Embora a simulação numérica não substitua completamente os experimentos, ela reduz os custos experimentais para projeto e otimização.

Este trabalho visa simular o escoamento no interior de um ciclone de vaso separador de uma unidade de FCC e avaliar sua performance através de sua eficiência, utilizando fluidodinâmica computacional.

SILVA (2007) estudou a influência do comprimento do *vortex finder* na eficiência de separação de um ciclone com as mesmas dimensões do ciclone utilizado neste trabalho. Ao utilizar uma malha tetraédrica com, em média, 125 mil nós e não realizar teste de malha, obteve uma eficiência de separação de 43,02%, utilizando uma velocidade de entrada para o ar de 5 m/s e diâmetro de partícula de 40 µm.

SILVA (2006) analisou o escoamento e avaliou o desempenho de um ciclone de diâmetro similar aos utilizados em plantas pilotos de FCC. Na primeira parte do trabalho, foram feitas simulações com um ciclone de diâmetro igual a 0,254 m, sendo as demais medidas de acordo com as relações propostas por LAPPLE (1951). As simulações foram realizadas para dois diâmetros de partículas: 3,70 µm (caso I) e 2,25 µm (caso II), com propriedades típicas de um catalisador. Utilizou-se 15,2 m/s de velocidade de entrada. Empregando-se uma malha tetraédrica, sem refino, com 70.439 elementos, os seguintes resultados foram obtidos: eficiência de 85,60% e queda de pressão de 1532,73 Pa, para o caso I, e 64,85% e 1885,22 Pa, para o caso II.

Modelagem

Foi utilizada a abordagem euleriana-euleriana na modelagem do escoamento bifásico. As equações de conservação abaixo, escritas de forma genérica, representam a modelagem empregada nas simulações. Informações mais detalhadas sobre os modelos do Fluent podem ser encontradas no manual do usuário do Fluent (ANSYS, 2009).

A equação da continuidade para a fase q é:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = 0$$

em que α_q , ρ_q e $\vec{v}_q$ são, respectivamente, a fração volumétrica, a densidade e a velocidade da fase q .

A equação de conservação de momento para a fase q :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \vec{F}$$

onde $\vec{F}$ representa o somatório das forças de sustentação, massa virtual, força de interação entre as fases, etc..

Como as forças de sustentação e massa virtual influenciam muito pouco no escoamento de suspensão em ciclones, elas foram desprezadas. O coeficiente de arraste (C_D) utilizado no termo de interação entre as fases foi o do modelo Schiller-Naumann (ANSYS, 2009).

$$C_D = \begin{cases} 24 (1 + 0,15 Re^{0,687}) / Re & \text{para } Re \leq 1000 \\ 0,44 & \text{para } Re > 1000 \end{cases} \quad Re = \frac{\rho_q |\vec{v}_p - \vec{v}_q| d_p}{\mu_q}$$

Re é o número de Reynolds relativo entre a fase primária q e a fase secundária p . μ_q e d_p são a viscosidade da fase q e o diâmetro da partícula (fase p), respectivamente.

O modelo de turbulência utilizado foi o Modelo das Tensões de Reynolds (RSM), que modela todos os componentes do tensor de Reynolds, o que é indicado para a alta anisotropia do escoamento rotacional. Trabalhos anteriores (SILVA, 2006; GIMBUN, CHUAH, *et al.*, 2005; XIANG e LEE, 2005) envolvendo ciclones e fluidodinâmica computacional comprovam que o RSM é o modelo mais adequado para este tipo de escoamento.

Metodologia

As simulações foram realizadas utilizando-se o *software* de fluidodinâmica computacional ANSYS 12.1. As simulações englobam as seguintes etapas: i. criação da geometria no DesignModeler; ii. criação da malha no ICEM; iii. definição da simulação (modelos, condições iniciais e de contorno, parâmetros de convergência, etc.) no FLUENT; iv. resolução do problema no FLUENT; v. análise dos resultados no CFX-POST.

Para garantir que o tamanho da malha não estaria influenciando o resultado da simulação, foi realizado um teste de malha com 5 tamanhos diferentes de malha, conforme indicado na Tabela 1, e a variável escolhida para representar os resultados da simulação foi a velocidade tangencial. No intuito de diminuir o esforço computacional, no teste de malha foram empregadas simulações monofásicas. Utilizaram-se malhas hexaédricas por apresentarem resultados melhores quando comparadas às tetraédricas.

Tabela 1. Tamanho das malhas.

Malha	Número de nós
1	235.696
2	417.146
3	617.052
4	800.142
5	1.011.303

A simulação bifásica foi realizada em regime transiente (passo de tempo de 0,00025s, resultando em 1,05s de escoamento simulado) e à temperatura constante de 700°C (temperatura do catalisador após a regeneração). Utilizou-se uma velocidade na entrada do ciclone de 15 m/s. Essa velocidade foi obtida no cálculo de similaridade dinâmica (número de Euler do modelo é igual ao do protótipo), assumindo-se que a queda de pressão no modelo e no protótipo são iguais e que o fluido utilizado é o mesmo.

A Tabela 2 resume as propriedades do fluido e da partícula utilizados na simulação. Devido à dificuldade de se obter os valores das propriedades da mistura gasosa proveniente do craqueamento,

utilizou-se o ar como fluido. Empregar o ar como fluido na simulação facilita uma posterior validação dos resultados através de experimentos. A partícula possui as mesmas propriedades de um catalisador de FCC.

Tabela 2. Propriedades do ar e da partícula utilizados na simulação.

Fluido	Partícula		
ar	gás ideal, incompressível	concentração na entrada	5 g/m ³
viscosidade a 700°C	4,11*10 ⁻⁵ kg/(m*s)	diâmetro médio ¹	22 µm
densidade a 700°C	0,36268 kg/m ³	densidade	1500 kg/m ³

¹Diâmetro obtido a partir de similaridade dinâmica (igualdade do número de Stokes), sendo o diâmetro real = 40 µm.

A Figura 1 mostra um esquema do ciclone utilizado nas simulações, cujas dimensões, calculadas a partir de similaridade geométrica com relação ao ciclone real, que possui aproximadamente 1 m de diâmetro, estão na Tabela 3. Para simplificar a simulação, não foi considerada a perna do ciclone onde fica a válvula de contrapeso, utilizada para descarregar o catalisador coletado.

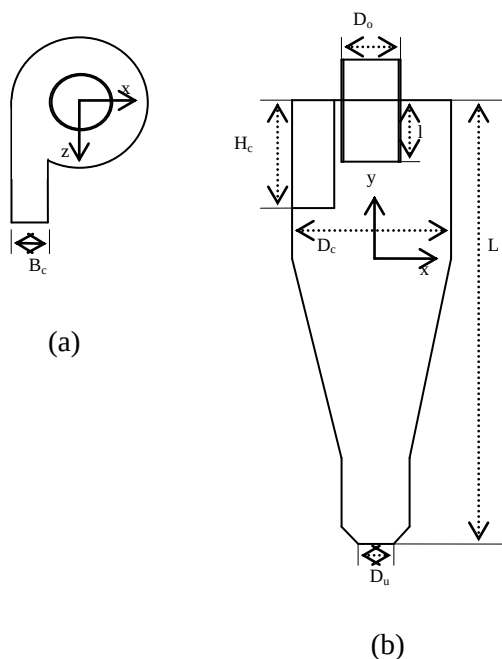


Tabela 3. Dimensões do ciclone, em centímetros.

D _c	D _o	D _u	l	H _c	B _c	L
30,0	12,0	8,0	24,0	20,0	8,0	100,0

Figura 1. Desenho esquemático do ciclone: (a) vista superior (b) vista frontal.

Resultados e Discussão

TESTE DE MALHA

O perfil de velocidade tangencial foi analisado em quatro diferentes alturas, conforme apresentado na Figura 2. Ao aumentar o número de nós, os perfis do componente tangencial da velocidade foram se modificando até que da malha 4 para a malha 5 não houve muita diferença. Com isso, concluiu-se que a melhor malha é a de aproximadamente 800 mil nós.

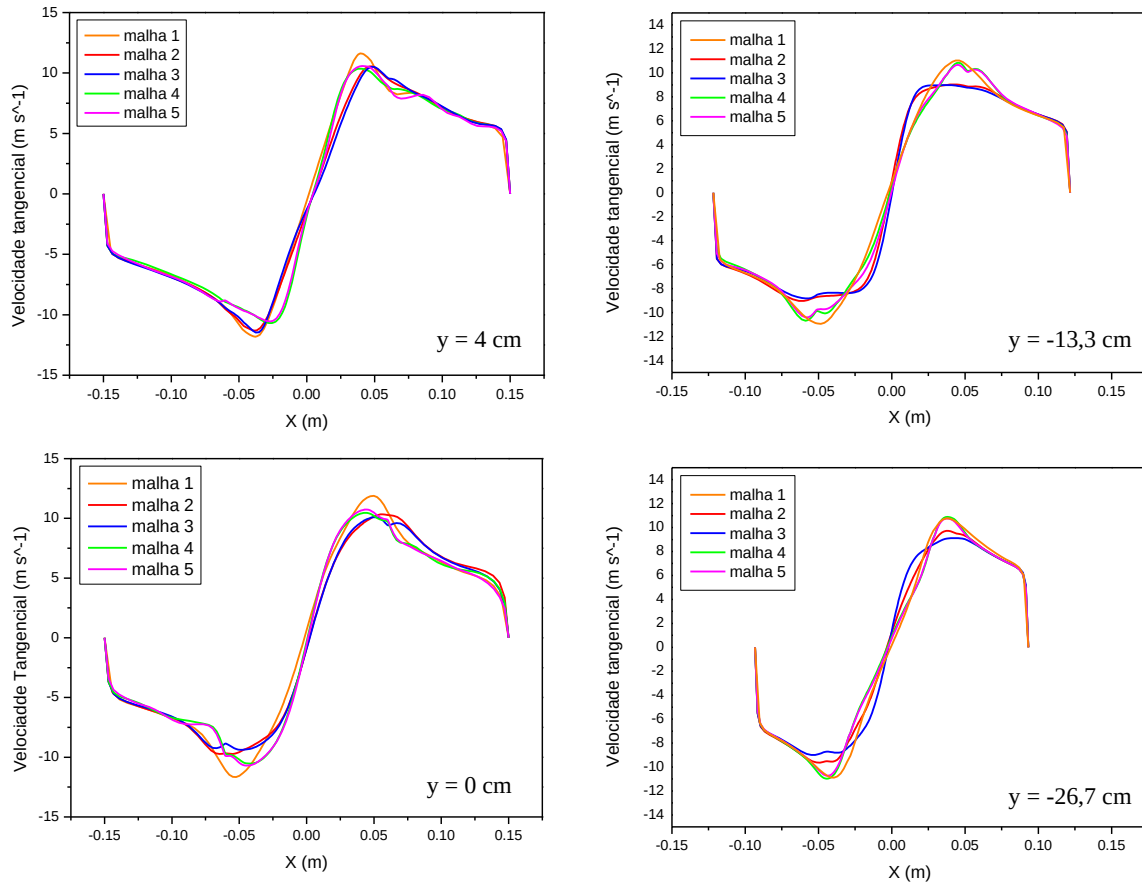


Figura 2. Perfil de velocidade tangencial do gás.

SIMULAÇÃO BIFÁSICA

A Figura 3 abaixo mostra a distribuição da velocidade tangencial do fluido e da pressão no plano (x,y). A velocidade tangencial dos gases aumenta desde valores menores perto da parede até um valor máximo ao redor do eixo de simetria. Conforme se aproxima do eixo diminui até cerca de zero perto do centro. A pressão diminui de um valor máximo na parede do ciclone até um valor mínimo perto do eixo do ciclone. Nessa região, há uma zona de pressão negativa, devido ao forte escoamento rotacional no interior do ciclone. Esses perfis estão de acordo com os estudos de TER LINDEN (1949).

Na Figura 4, pode ser visto o perfil de frações volumétricas da partícula no plano (x,y). Ela mostra que a separação entre as partículas de catalisador e o fluido é extremamente rápida.

No intuito de se considerar a separação devida somente ao campo centrífugo, calculou-se a eficiência granulométrica reduzida (G'), em que a razão de fluido (R_f) é descontada.

$$G' = \frac{G - R_f}{1 - R_f} \quad \text{onde} \quad G = \frac{\dot{m}_s}{\dot{m}_e} \quad R_f = \frac{Q_{fs}}{Q_{fe}}$$

e G é a eficiência granulométrica, $\dot{m}_s$ e $\dot{m}_e$ são as vazões mássicas de sólidos na saída inferior e na entrada e Q_{fs} e Q_{fe} são as vazões volumétricas de fluido na saída inferior e na entrada, respectivamente.

A eficiência granulométrica obtida na simulação para a partícula de 22 μm foi de 99,5%. Esta eficiência granulométrica reduzida é bem próxima da eficiência global obtida em sistemas de ciclones de dois estágios, que é igual ou superior a 99,995% (SADEGHBEIGI, 2000).

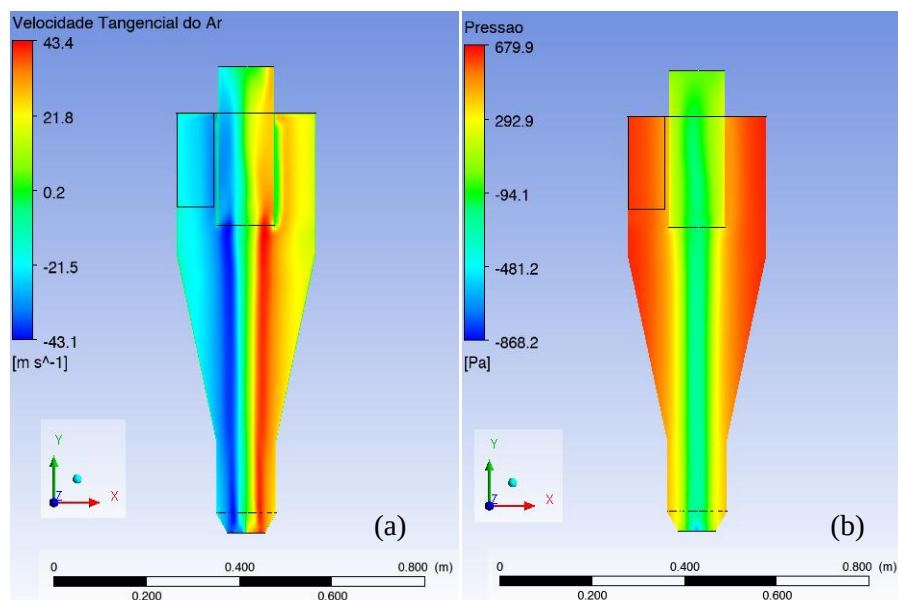


Figura 3. Corte axial demonstrando os perfis de velocidade (a) e de pressão (b) no interior do ciclone.

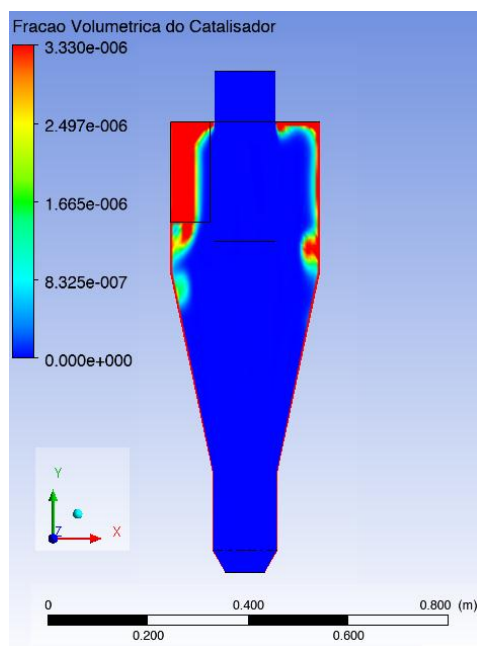


Figura 4. Fração volumétrica de sólidos.

Conclusões

A simulação numérica, através dos modelos utilizados (Euler-Euler, para a modelagem bifásica e RSM, para a modelagem da turbulência) e da malha de qualidade (800.142 nós, refinada nas paredes), se mostrou bastante eficiente para representar o escoamento gás-sólido no ciclone utilizado no vaso separador de unidades de FCC.

Como trabalho futuro, pretende-se avaliar a influência da largura do duto de alimentação, do comprimento do *vortex finder* e do diâmetro do duto de saída do gás na eficiência de separação, obtendo-se, ao final, uma geometria ótima.

Agradecimentos

Ao Laboratório de Fluidodinâmica Computacional (LabCFD-EQ/UFRJ), pelo suporte durante o trabalho, à FINEP pelo apoio financeiro, ao PRH-13 e à ANP.

Referências Bibliográficas

ANSYS, FLUENT 12.0 - Theory Guide, April 2009.

GIMBUN, J. et al. Prediction of the effects of cone tip diameter on the cyclone performance. **Journal of Aerosol Science**, v. 36, n. 8, p. 1056-1065, 2005.

NICCUM, P. K. 20 questions: Identify probable causes for high FCC catalyst loss. **Hydrocarbon Processing**, 2010.

SADEGHBEIGI, R. **Fluid Catalytic Cracking Handbook**. 2. ed. [S.l.]: Elsevier Inc., 2000.

SILVA, Guilherme Pimentel de Maria da. **Simulação Numérica de um Ciclone para Recuperação de Catalisador de Unidades de FCC**. Rio de Janeiro, 2007. 46 p. Projeto de Final de Curso. Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SILVA, Marcela Kotsuka da. **Estudo de modelagem numérica tridimensional de ciclones do tipo Lapple para separação gás-sólido**. Florianópolis, 2006. 78 p. Dissertação de Mestrado. Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.

SUN, G.; CHEN, J.; SHI, M. Optimization and applications of reverse-flow cyclones. **China Particuology**, v. 3, n. 1-2, p. 43-46, 2005.

TER LINDEN, A. J. Investigations into cyclone dust collectors. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, v. 160, p. 233-251, 1949.

XIANG, R. B.; LEE, K. W. Numerical study of flow field in cyclones of different height. **Chemical Engineering and Processing**, v. 44, n. 8, p. 877-883, 2005.