



2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA SEPARAÇÃO ÁGUA-ÓLEO EM HIDROCICLONES

Leahy-Dios, A., Medronho, R.A.

Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, CT, Bl. E, 21949-900 Rio de Janeiro-RJ, Brazil; alanaleahy@ig.com.br, medronho@ufrj.br

Resumo – Foram realizadas simulações numéricas, com o auxílio de fluidodinâmica computacional (CFD), do escoamento em hidrociclones objetivando o estudo da separação água-óleo de misturas contendo óleo em concentração volumétrica de 0,1 e 1%. Foram investigados os efeitos da variação de proporções geométricas do hidrociclone, modelos de turbulência e diâmetros de gotas de óleo na mistura de alimentação sobre o escoamento e a eficiência de separação. Foram estudados os hidrociclones de Bradley típico e duas modificações, e de Thew típico. Os modelos de turbulência estudados foram o RNG κ - ϵ e o Reynolds Stress Model (RSM). Os diâmetros de gota de óleo utilizados nas simulações foram de 2,08 μ m, 6,35 μ m, 10,12 μ m, e 100 μ m, tendo sido alguns resultados comparados com dados experimentais disponíveis. Os resultados não foram afetados significativamente pelo modelo de turbulência escolhido. Os hidrociclones de Bradley típico mostraram maiores eficiências. O hidrociclone de Thew gerou as menores queda de pressão e eficiência.

Palavras-Chave: hidrociclones, separação, óleo, simulação

Abstract – Numerical simulations of hydrocyclone flows were carried out aiming at the investigation of water-oil separation of mixtures with oil at 0,1% and 1% volumetric concentrations, using computational fluid dynamics (CFD). Effects of hydrocyclone geometry, turbulence model and drop diameter variations over flow and separation efficiencies were studied. Geometries examined were typical and modified Bradley hydrocyclone and typical Thew hydrocyclone. Turbulence models considered were the RNG κ - ϵ model and the Reynolds Stress Model (RSM). Drop diameters at the feed mixture used were 100 μ m, 10,12 μ m and 2,08 μ m. Some of the numerical results obtained were compared to experimental data available. Results were not significantly affected by the selected turbulence model. The typical Bradley hydrocyclones yielded greater separation efficiencies. The Thew hydrocyclone yielded the lowest pressure drop and efficiency.

Keywords: hydrocyclones, separation, oil, simulation

1. Introdução

Na exploração de petróleo em alto-mar, uma fração de água salgada é retirada do poço junto com o petróleo. A corrente do poço é enviada a um separador, onde esta água é separada do óleo e gás. Muitas vezes ela ainda contém um teor de óleo disperso acima do limite estabelecido pelos órgãos de controle ambiental; devendo ser tratada antes do descarte para evitar a poluição marinha. Hidrociclones são equipamentos de separação que apresentam elevadas capacidades e baixo custo de manutenção, parecendo indicados no tratamento do efluente aquoso de tais separadores.

O estudo teórico do escoamento em hidrociclones é feito através das equações de conservação de massa e momento, que são equações diferenciais parciais não lineares, de difícil resolução analítica. Com o considerável avanço dos computadores, a simulação numérica de escoamentos, através da dinâmica dos fluidos computacional (CFD), tornou possível a obtenção de informações sobre estes escoamentos, auxiliando em muito o projeto de equipamentos.

2. Modelagem do Escoamento

O escoamento dentro do hidrociclone é multifásico, composto por água, óleo e, usualmente, gás presente no núcleo central gasoso. As equações levam em conta a presença das fases contínua (água) e dispersas (óleo e gás), denotadas por letras gregas minúsculas, α , β e γ . As equações do movimento e da continuidade para cada fase são dadas pelas Equações (1) e (2), respectivamente (CFX 5, 2002).

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha U_\alpha) + \nabla \cdot (r_\alpha (\rho_\alpha U_\alpha U_\alpha)) = -r_\alpha \nabla P_\alpha + \nabla \cdot (r_\alpha \mu_\alpha (\nabla U_\alpha + (\nabla U_\alpha)^T)) + S_{M\alpha} + M_\alpha \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha) + \nabla \cdot (r_\alpha (\rho_\alpha U_\alpha)) = 0 \quad (2)$$

Onde r_α : fração volumétrica de α ; ρ_α : densidade de α ; μ_α : viscosidade de α ; U_α : velocidade de α ; P_α : pressão parcial de α ; $S_{M\alpha}$: fonte de quantidade de movimento por forças externas; M_α : forças interfaciais em α por outras fases.

Na fluidodinâmica computacional, estas equações são discretizadas, sendo obtido um sistema de equações algébricas de mais fácil resolução. Em contraste com a solução analítica ou experimental, a solução gerada é a descrição numérica do escoamento, sendo válida enquanto modelos físicos e condições de contorno forem válidos (Ferziger e Péric, 1996). Os principais resultados de interesse são as distribuições de velocidades, pressões e concentrações. Para que os resultados da simulação sejam os mais próximos possíveis da realidade, gerando valores reais, é de extrema importância a correta modelagem da turbulência existente no processo. Os modelos de turbulência utilizados neste trabalho são descritos abaixo.

O modelo RNG- κ - ε é descrito pelas equações (3) e (4).

$$\frac{\partial \rho \kappa}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \kappa) - \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\kappa} \nabla \kappa \right) = P_\kappa - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \varepsilon) - \nabla \cdot \left(\frac{\mu_{eff}}{\sigma_{\varepsilon RNG}} \nabla \varepsilon \right) = \frac{\varepsilon}{\kappa} (C_{\varepsilon 1 RNG} P_\kappa - C_{\varepsilon 2 RNG} \rho \varepsilon) \quad (4)$$

Onde $C_{\varepsilon 1 RNG}$, f_η , η são coeficientes do modelo e $C_{\varepsilon 2 RNG}$, $C_{\mu RNG}$, β_{RNG} , $\sigma_{\kappa RNG}$, $\sigma_{\varepsilon RNG}$ são constantes do modelo.

O modelo dos Tensores de Reynolds (RSM), que resolve equações para o transporte das tensões de Reynolds, está representado pela Equação (5).

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) - \nabla \cdot (\mu \nabla U) = -\nabla p'' - \nabla \cdot (\overline{\rho u \otimes u}) + B \quad (5)$$

Onde p'' é a pressão modificada; B é a soma das forças de corpo; $\overline{\rho u \otimes u}$ é a flutuação das tensões de Reynolds.

3. Materiais e Métodos

Nas simulações, foi utilizado o software CFX 5.5.1, da AEA Technology Inc., em um microcomputador com processador Intel Pentium 4, 1.8 GHZ, com 512 MB de memória RAM. As geometrias 1, 2 e 3 (Figura 1) correspondem

ao hidrociclone de Bradley típico (Bradley, 1965) e duas modificações, e a geometria 3 (Figura 2) ao hidrociclone de Thew típico (Nezhati eThew, 1987). As proporções geométricas destes equipamentos são mostradas na Tabela 1.

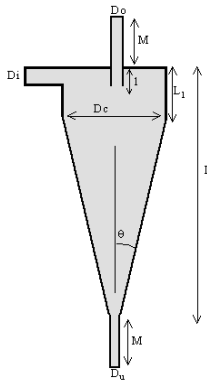


Figura 1: Dimensões para Hidrociclone de Bradley

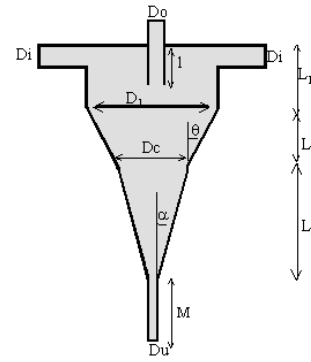


Figura 2: Dimensões para Hidrociclone de Thew

Tabela 1: Diâmetros e proporções geométricas dos hidrociclones estudados

Geometria	1 - Bradley típico	2 - Bradley mod. 1	3 - Bradley modificado 2	4 - Thew típico
D _c	10 mm	10 mm	20 cm	10 cm
D _i	D _c /7	D _c /7	D _c /7	0,35 D _c
D _o	D _c /5	D _c /5	D _c /5	0,05 D _c
D _u	3D _c /20	3D _c /20	3D _c /10	0,5 D _c
D ₁	-	-	-	2D _c
l	D _c /3	D _c /3	D _c /3	0
L ₁	-	-	-	2 D _c
M	15 mm	15 mm	-	60 D _u
θ	4,5 °	9 °	3 °	10 °
α	-	-	-	0,75 °

Para cada simulação foram calculados queda de pressão e vazões mássicas de cada fase nas correntes de topo (*overflow*) e fundo (*underflow*). Com base nestas últimas, é possível calcular-se as eficiências granulométricas (Equação 6).

$$G = \frac{W_{s|d}}{W_s|d} \quad (6)$$

Onde G é a eficiência granulométrica e $W_{s|d}$ e $W_s|d$ as vazões mássicas de óleo no topo e na alimentação, respectivamente.

A tabela 2 mostra as principais variáveis utilizadas nas simulações.

Tabela 2: Variáveis utilizadas nas simulações

Simulação	Geometria	V _{Alim} (m/s)	P _{Entrada} (atm)	C _v óleo	d _{gota} (µm)	ρ _{óleo} (kg/m ³)	μ _{óleo} (cP)	P _{saida} (atm)	Modelo Turbul.	No. de Células
1 - HC_7	Bradley mod.2	5	-	0,1 %	100,00	920	32,0	1	RNG κ-ε	334.044
2 - HC_8	Thew típico	5	-	0,1 %	100,00	920	32,0	1	RNG κ-ε	238.839
3 - HC_12_C	Bradley mod. 1	-	4	1,0 %	2,08	840	13,2	1	RNG κ-ε	358.234
4 - HC_21	Bradley mod. 1	-	4	1,0 %	2,08	840	13,2	1	RSM	358.234
5 - HC_33	Bradley típico	-	4	1,0 %	2,08	840	13,2	1	RNG κ-ε	325.731
6 - HC_34	Bradley típico	-	4	1,0 %	6,35	840	13,2	1	RNG κ-ε	325.731
7 - HC_35	Bradley típico	-	4	1,0 %	10,12	840	13,2	1	RNG κ-ε	325.731
8 - HC_36	Bradley típico	-	4	1,0 %	100,00	840	13,2	1	RNG κ-ε	325.731

Nas simulações 1 e 2 foi variada apenas a geometria utilizada. Nas simulações 3 e 4 foi modificado o modelo de turbulência. As simulações 5 a 7 foram feitas baseadas em dados experimentais, sendo possível a comparação dos resultados com dados de laboratório (Pecora, 2002).

4. Resultados e Discussão

As Figuras 1, 2, 3 e 4 mostram hidrociclones gerados para cada geometria proposta.

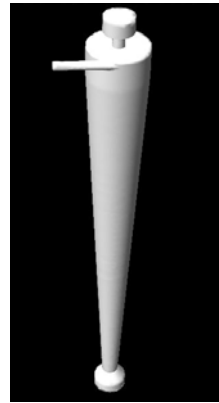
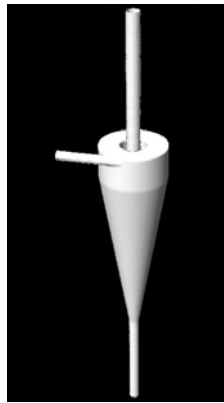


Figura 1: Bradley típico

Figura 2: Bradley mod. 1

Figura 3: Bradley mod. 2

Figura 4: Thew típico

Os resultados são mostrados na Tabela 3, assim como o número de iterações de cada simulação.

Tabela 3: Resultado das simulações

Sim.	Geometria	nº iter.	ΔP (Pa)	Vazão Mássica (Kg/s)				G (%)
				Alimentação		Overflow	Underflow	
				Água	Óleo	Óleo	Óleo	
1	Bradley mod.2	1403	8,74E+05	2,88	2,63E-03	5,44E-04	2,03E-03	20,69
2	Thew típico	1368	9,92E+03	6,11	5,58E-03	3,60E-05	5,53E-03	0,65
3	Bradley mod. 1	541	3,05E+05	4,78E-02	4,06E-04	2,37E-04	1,65E-04	58,36
4	Bradley mod. 1	484	3,05E+05	5,29E-02	4,50E-04	2,58E-04	1,88E-04	57,25
5	Bradley típico	658	2,51E+05	5,91E-02	5,02E-04	2,96E-04	2,04E-04	58,93
6	Bradley típico	620	2,51E+05	5,91E-02	5,03E-04	3,00E-04	2,00E-04	59,64
7	Bradley típico	590	2,51E+05	5,91E-02	5,03E-04	3,06E-04	1,93E-04	60,83
8	Bradley típico	485	2,51E+05	5,91E-02	5,15E-04	4,63E-04	2,15E-05	90,01

A Figura 5 mostra a malha gerada para o hidrociclone de Bradley mod. 1. Todas as outras malhas seguiram o mesmo padrão de construção. A Figura 6 mostra linhas de corrente para a parte superior do hidrociclone de Thew. Como pode ser visto na Tabela 3 (simulação 2), este hidrociclone apresentou uma baixíssima eficiência granulométrica G para uma gota de óleo de 100 μm , quando descarregando as 2 correntes de saída à pressão atmosférica. Provavelmente por isso, Thew opera seu hidrociclone com *backpressure* no *underflow*.

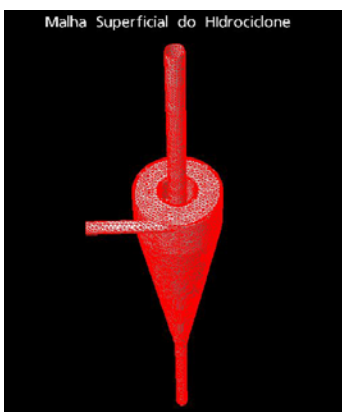


Fig 5: Malha gerada, Bradley mod. 1, sim 3



Figura 6: Linhas de Corrente, Thew, sim 2

A tabela 4 mostra os resultados das simulações 3 e 4, com diferentes modelos de turbulência. Os resultados são bastante similares, como mostrado nas Figuras 7 e 8. Porém, o maior tempo gasto na simulação com o modelo RSM faz com que o modelo RNG κ - ϵ seja mais adequado para as simulações conduzidas nesse trabalho.

Tabela 4: Comparação entre modelos de turbulência utilizados

Sim.	Modelo de Turb.	dgota (μm)	nº iterações	Tempo total (s)	Tempo por iter (s)	$\Delta P_{\text{saída}}$ (Pa)	G (%)
3	RNG κ - ϵ	2,08	541	7,52 E-04	139,0	3,05 E+05	58,36
4	RSM	2,08	484	8,99 E-04	185,7	3,05 E+05	57,25

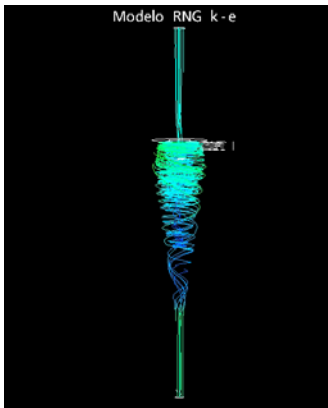
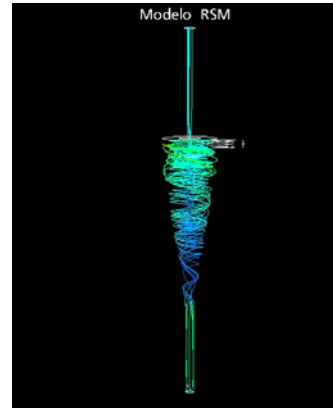
Figura 7: Linhas de corrente, mod. RNG κ - ϵ , sim. 3

Figura 8: Linhas de corrente, mod. RSM, sim 4

Uma comparação entre resultados experimentais e numéricos é mostrada na tabela 5. Os resultados experimentais apresentam valores de eficiência granulométrica superiores aos numéricos. Tal diferença pode ser atribuída à falta de suficiente refinamento da malha utilizada nas simulações, junto à parede, não permitindo, portanto, resolver adequadamente a camada limite, e em torno do eixo central do hidrociclone, onde está localizada a interface óleo/água. Além disso, os resultados experimentais utilizados parecem estar superavaliados. Parece bastante improvável a obtenção de eficiência granulométrica de 96,5 % em separação água-óleo para diâmetro de gota de apenas 2,08 μm ou de 99% para 10 μm . Resultados experimentais com geometria, óleo e condição de operação equivalentes (Harms e Bohnet, 1996) mostram eficiências granulométricas próximas de 50 % para diâmetro de gota de 10 μm , o que está mais próximo dos valores simulados. À continuação do presente trabalho, pretende-se repetir as simulações com uma malha mais refinada, como descrito acima, além de simular-se o hidrociclone utilizado por Harms e Bohnet (1996).

As Figuras 9 a 12 mostram os perfis de pressão para as simulações 1, 2, 3 e 5. A maior queda de pressão ocorre no hidrociclone de Thew típico, mesmo em condições operacionais mais brandas, devido ao pequeno diâmetro de topo.

Tabela 5: Comparação entre resultados experimentais e simulados de eficiência granulométrica

Diâmetro da Gota	Eficiências Granulométricas		
	Resultado experimental	Dados numéricos	Simulação
2,08 μm	96,5 %	58,9 %	5
6,35 μm	98,0 %	59,9 %	6
10,12 μm	99,0 %	60,8 %	7

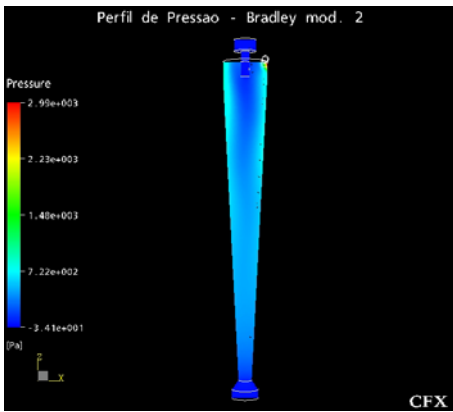


Figura 9: Perfil de Pressão, Bradley mod. 2, sim. 1

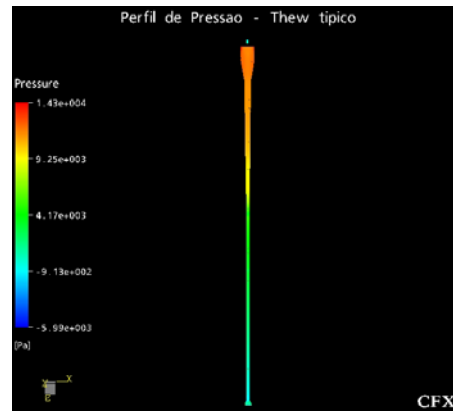


Figura 10: Perfil de Pressão, Thew típico, sim. 2

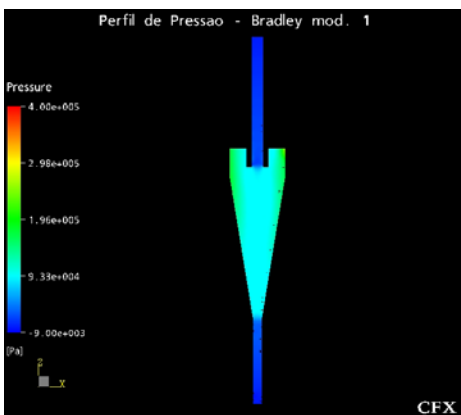


Figura 11: Perfil de Pressão, Bradley mod., sim 3

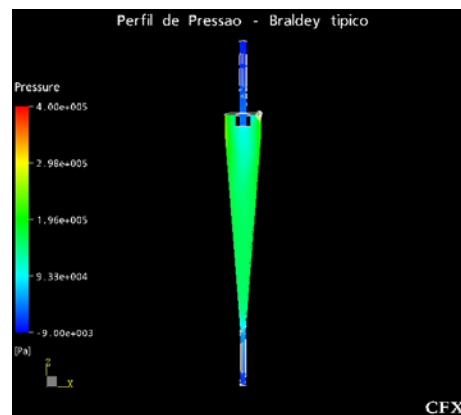


Figura 12: Perfil de Pressão, Brad. típico, sim. 5

5. Conclusões

Os resultados obtidos não foram afetados significativamente pelo modelo de turbulência escolhido (RNG k- ϵ ou RSM) ou pela introdução de ar como uma terceira fase, caso ocorresse escoamento reverso (*backflow*) nas saídas do hidrociclone. Uma comparação entre as quatro geometrias estudadas mostrou que o hidrociclone de Bradley típico gerou as maiores eficiências, enquanto que o hidrociclone de Thew gerou as menores queda de pressão e eficiência. Os resultados numéricos de eficiência granulométrica foram inferiores aos resultados experimentais disponíveis para o hidrociclone de Bradley típico.

6. Agradecimentos

Agradecimento à Agência Nacional de Petróleo (ANP), pelo apoio através do Programa EQ/ANP-PRH 13, e à Escola de Química/UFRJ.

7. Referências

- BRADLEY, D., *The Hydrocyclone*, Pergamon Press, Londres, 1965.
- FERZIPER, J. H., PÉRIC, m. *Computational Methods for Fluid Dynamics*, Springer, Berlim, 1996.
- HARGREAVES, J. H., SILVESTER, R.S, *Computational Fluid Dynamics applied to the Analysis of Deoiling Hydrocyclone Performance*, Trans Institute of Chem Eng, v. 68, p. 365-383, 1990.
- HARMS, G., BOHNET M., *Trennen nicht-mischbarer Flüssigkeiten im Hydrozyklon*, Chemie Ingenieur Technik, v. 68, p. 558-562, 1996
- Manual do CFX 5, Versão 5.5.1, AEA Technology Inc, 2002.
- NEZHATI, K., THEW, M. T., *Aspects of the Performance and Scaling of Hydrocyclones for use with Light Dispersions*, 3rd Inter. Conference on Hydrocyclones, Oxford, England, Paper G1, p. 167-180, 1987.
- PECORA, R. H. G., *Separação de Emulsões óleo-água em hidrociclones*, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia, 2002.