

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Gelmirez Martins Raposo

**Simulação Numérica do Escoamento em
Hidrociclone Destinado a Aplicações de Alto Teor
de Óleo**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientadora: Angela Ourivio Nieckele

Rio de Janeiro
Dezembro de 2008



Gelmirez Martins Raposo

**Simulação Numérica do Escoamento em
Hidrociclone Destinado a Aplicações de Alto Teor
de Óleo**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Profa. Angela Ourivio Nieckele

Orientadora

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Dr. Carlos Alberto Capela Moraes

PETROBRAS

Dr. Luiz Eduardo Bittencourt Sampaio

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 12 de dezembro de 2008

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Gelmirez Martins Raposo

Graduou-se em Engenharia Química na UFRJ no ano de 1998, pós graduação na COPPE-UFRJ no ano de 1999 e iniciado o mestrado na PUC-RJ em 2006

Ficha Catalográfica

Raposo, Gelmirez Martins

Simulação numérica do escoamento em hidrociclone destinado a aplicações de alto teor de óleo / Gelmirez Martins Raposo ; orientadora: Angela Ourivio Nieckele. – 2008.

108 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Separação ciclônica. 3. Hidrociclone, modelo de turbulência. 4. Condição de entrada. 5. Solução numérica. I. Nieckele, Angela Ourivio. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Agradecimentos

À minha orientadora Professora Angela Ourivio Nieckele pelo estímulo, cuidado e atenção para a realização deste trabalho.

À PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

À PETROBRAS, pela liberação e apoio financeiro.

Ao meu colega de trabalho, Marcos, pelo empréstimo dos recursos de informática, e aos colegas Capela e Luiz Philipe pelas orientações, sugestões e dados experimentais.

À empresa ESSS e seus profissionais pela apoio no uso das ferramentas de informática.

Aos meus colegas do curso de pós graduação da PUC-Rio, em especial Alan, Selma e Roberto, pela ajuda nos estudos e trabalhos.

À minha família, e em especial à minha mulher e companheira Fabiana, pelo apoio e compreensão ao longo de todo o tempo empreendido na dissertação.

Aos professores e doutores que participaram da Comissão examinadora.

A todos os professores e funcionários do Departamento pelos ensinamentos e pela ajuda.

A todos os amigos que de uma forma ou de outra me estimularam ou me ajudaram.

Resumo

Raposo, Gelmirez M., Nieckele, Angela O. **Simulação Numérica do Escoamento em Hidrociclone Destinado a Aplicações de Alto Teor de Óleo.** Rio de Janeiro, 2008. 108p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A separação ciclônica vem se tornando nas últimas décadas um processo cada vez mais utilizado na separação gás-líquido, líquido-líquido e sólido-líquido, principalmente na indústria do petróleo. Com o crescente aumento das prospecções marítimas torna-se necessário reduzir o peso e a dimensão de equipamentos. Isto pode ser conseguido com a separação ciclônica, uma vez que pode-se criar um campo centrífugo diversas vezes superior ao campo gravitacional, tornando possível o desenvolvimento de equipamentos bastante compactos. A principal diferença entre os diversos ciclones é a sua geometria. A otimização dos mesmos para as variadas aplicações é, a cada ano, baseada menos em experimentos e mais em modelos matemáticos. No presente trabalho foi investigada a adequação dos modelos de turbulência de Tensões de Reynolds RSM (Reynolds Stress Model) e Grandes Escalas LES (Large Eddy Simulation) para a previsão do escoamento em um hidrociclone de alto teor de óleos através da comparação com dados experimentais e numéricos disponíveis na literatura. Após essa etapa foi investigada a influência de diversos parâmetros operacionais e geométricos como vazão, rugosidade e comprimento do hidrociclone no escoamento. Ambas as metodologias mostraram vantagens e deficiências, sendo que o modelo LES apresentou precisão superior com relação aos parâmetros turbulentos. Com relação à variação nos parâmetros do equipamento, a metodologia RSM foi capaz de prever corretamente, de acordo com evidências experimentais, a mesma tendência de redução de perda de carga com redução da vazão, aumento da rugosidade e comprimento.

Palavras-chave

Separação ciclônica, hidrociclone, modelo de turbulência, condição de entrada, solução numérica.

Abstract

Raposo, Gelmirez M.; Nieckele, Angela O. **Numerical simulation for hydrocyclone designed to high oil content application.** Rio de Janeiro, 2008. 108p. Msc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Cyclonic separation has become more and more important during the last decades as a unit process for gas-liquid, liquid-liquid and solid-liquid separation, mostly in the Petroleum industry. The off-shore exploration's growth requires the development of smaller and lighter equipment. This can be achieved by cyclonic separation once centrifugal fields are several times stronger than gravity. This allows the construction of very compact systems. The major difference between the various cyclones is their geometry. Cyclone optimization for different uses is, every year, less based on experiments and more based on mathematical models. In the present work, the applicability of turbulent models, Reynolds Stress Model (RSM) and Large Eddy Simulation, was investigated to predict the flow inside a high oil content hydrocyclone, comparing the results with experimental and numerical data available in the literature. After this point, the influence on flow of operational and geometric parameters such as inlet flow, roughness and hydrocyclone length was evaluated. Both models have shown advantages and problems, being LES more accurate over turbulent parameters. Regarding the changing on hydrocyclone parameters, RSM model was able to foresee, on good agreement with experimental data, the expected results like reduction on pressure drop with: the inlet flow decreasing; increasing of roughness; and length.

Keywords

Cyclonic separation, hydrocyclone, turbulence model, inlet conditions, numeric solution.

Sumário

1	Introdução	15
1.1	Objetivo	21
1.2	Organização do manuscrito	22
2	Revisão bibliográfica	23
3	Modelo Matemático.....	31
3.1	Equações médias de Navier Stokes	34
3.1.1	Modelos de viscosidade Turbulenta: Modelo k-e RNG.....	35
3.1.2	Modelo RSM.....	38
3.2	Simulação de Grandes Escalas (LES)	41
3.3	Tratamento junto a parede	42
4	Método numérico	48
4.1	Pré-processamento	53
4.1.1	Definição da malha.....	57
4.1.2	Influência da Geometria de entrada	61
5	Resultados	66
5.1	Influência dos modelos de turbulência	68
5.2	Influência da vazão na entrada	74
5.3	Influência da rugosidade das paredes	78
5.4	Influência do comprimento do hidrociclone.....	80
5.5	Campo de velocidade e pressão.....	82
5.6	Grandezas turbulentas	86
6	Conclusões	93
	Referências bibliográficas	97
	Apêndice A	103

Lista de tabelas

Tabela 4.1 - Fatores de sub-relaxação utilizados na solução com diferentes modelos de turbulência	56
Tabela 4.2 - Comparativo da qualidade das malhas nas referências bibliográficas	57
Tabela 5.1 - Influência dos modelos de turbulência sobre a perda de pressão calculada ao longo do hidrociclone (pressão na entrada – saída de fundo)	74
Tabela 5.2 - Influência da vazão na perda de pressão ao longo do hidrociclone	75
Tabela 5.3 - Influência da rugosidade na perda de pressão ao longo do hidrociclone com modelo $\kappa-\varepsilon$	79
Tabela 5.4 - Influência da rugosidade na perda de pressão ao longo do hidrociclone com o modelo RSM	79
Tabela 5.5 - Influência do comprimento do hidrociclone na perda de pressão	81
Tabela 5.6 - Comparação do tempo de residência calculado de diferentes formas e para diferentes modelos de turbulência	84
Tabela 5.7 - Número de "swirl" para diferentes planos radiais ao longo do hidrociclone	85
Tabela A.1 - Pressões estáticas médias em Pa, diferencial de pressão e razão de pressões com diferentes malhas	104

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Hidrociclone “de-oiling” de Colman-Thew	16
Figura 1.2 - Evolução do hidrociclone de Colman-Thew	18
Figura 1.3 - Hidrociclone para separação de sólidos da Perspex	18
Figura 1.4 - Fluxo axial reverso formado no interior de hidrociclones	19
Figura 1.5 - Hidrociclone ATO em acrílico (Petrobras)	22
Figura 2.1 - Exemplo de medições obtidas com a técnica de LDA	29
Figura 2.2 - Campo de vetores de velocidade obtidos com PIV	30
Figura 3.1 - Esquema do hidrociclone de alto teor de óleo	31
Figura 3.2 - Modelo simplificado adotado	32
Figura 4.1 - Volume de controle	49
Figura 4.2 - Sequência de solução do modelo numérico do escoamento em CFD	53
Figura 4.3 - Diversos modelos de hidrociclones montados com malhas hexaédricas	54
Figura 4.4 - Hexaedros do modelo e detalhe dos prismas utilizados na entrada tangencial	55
Figura 4.5 - Vista superior da malha 1500b, destacando o número de divisões ao longo do perímetro circular e do raio do hidrociclone	58

Figura 4.6 - Corte radial mostrando detalhe da transição da malha hexaédrica para a região com hexaedros e prismas	59
Figura 4.7 - Resultados da componente tangencial da velocidade média sobre linhas radiais ao longo do hidrociclone, obtidos com a malha de prismas e hexaedros na projeção do rejeito	60
Figura 4.8 - Detalhe da nova malha com um cilindro irreal ao redor da linha axial do hidrociclone	61
Figura 4.9 - Geometria da entrada utilizada por Raposo et al (2008)	62
Figura 4.10 - Evolução da componente tangencial da velocidade obtida experimentalmente e com o modelo RSM para geometria de entrada simplificada e RSM geometria real	64
Figura 4.11 - Evolução da componente axial da velocidade obtida experimentalmente e com o modelo RSM para geometria de entrada simplificada e RSM geometria real	65
Figura 5.1 - Posição das linhas ao longo do hidrociclone onde foram medidos os perfis de velocidade	67
Figura 5.2 - Evolução da componente tangencial da velocidade média obtida experimentalmente e com os modelos RSM e LES para $6,2\text{m}^3/\text{h}$ (a) linha 180 mm (b) linha 220 mm	70
Figura 5.3 - Evolução da componente tangencial da velocidade média obtida experimentalmente e com os modelos RSM e LES para $6,2\text{m}^3/\text{h}$ (a) linha 440 mm (b) linha 600 mm	71
Figura 5.4 - Evolução da componente axial da velocidade média obtida experimentalmente e com os modelos RSM e LES para $6,2\text{m}^3/\text{h}$ (a) linha 180 mm (b) linha 220 mm	72
Figura 5.5 - Evolução da componente axial da velocidade média obtida experimentalmente e com os modelos RSM e LES para	73

6,2m³/h (a) linha 440 mm (b) linha 600 mm

Figura 5.6 - Componente tangencial da velocidade para diferentes vazões, modelo RSM, esquema QUICK	76
Figura 5.7 - Componente axial da velocidade para diferentes vazões, modelo RSM, esquema QUICK	76
Figura 5.8 - Componente tangencial da velocidade para diferentes vazões, modelo LES	77
Figura 5.9 - Componente axial da velocidade para diferentes vazões, modelo LES	77
Figura 5.10 - Influência da rugosidade na evolução da componente tangencial de velocidade sobre a linha 180 mm: Modelo $\kappa-\varepsilon$	78
Figura 5.11 - Influência da rugosidade na evolução do componente tangencial de velocidade sobre as linhas radiais: Modelo RSM (esquema QUICK)	80
Figura 5.12 - Influência da extensão do trecho cilíndrico na componente tangencial da velocidade com os modelos RSM e LES	81
Figura 5.13 - Distribuição da aceleração centrífuga em diversos cortes radiais, determinada com RSM e LES, 6.2 m ³ /h	82
Figura 5.14 - Distribuição da razão entre a pressão absoluta e a pressão na entrada em diferentes linhas radiais com os modelos RSM e LES	83
Figura 5.15 - Deformação do cone reverso junto à saída do "underflow" materializada pela iso-superfície de velocidade axial 0,1 m/s em dois instantes diferentes, resultados obtidos com LES	84
Figura 5.16 - Trajetória de partículas lagrangeanas de mesma	85

densidade que a fase contínua

Figura 5.17 - Isóbaras (pressão estática, kPa) em diferentes posições axiais, evidenciando a flutuação do cone reverso central, simulação LES	86
Figura 5.18 - Evolução de y^+ ao longo da parede do hidrociclone	87
Figura 5.19 - Razão de energia contidas nas escalas submalha pelas resolvidas	88
Figura 5.20 - Número de Reynolds turbulento avaliado em diferentes posições axiais para o modelo RSM	88
Figura 5.21 - Contornos de produção turbulentos (m^2/s^2) para o modelo RSM na posição axial de 105mm	89
Figura 5.22 - Intensidades turbulentas tangenciais obtidas com os modelos RSM e LES	90
Figura 5.23 - Intensidades turbulentas axiais obtidas com os modelos RSM e LES	91
Figura 5.24 - Perfis de velocidade radial em diferentes posições axiais	92
Figura A.1 - Parâmetros monitorados ao longo da convergência para a malha 1500	103
Figura A.2 - Perfis ortogonais de velocidades tangenciais	105
Figura A.3 - Perfis ortogonais de velocidades axiais	106
Figura A.4 - Perfis tangenciais, comparativo entre malhas 500, 1000, 1500 e 1500b	107
Figura A.5 - Perfis axiais, comparativo entre malhas 500, 1000, 1500 e 1500b	107

Lista de símbolos

A	Área
C	Constante, tensor convecção
D	Diâmetro, difusão molecular, difusão turbulenta
f	Função
F	taxa de produção por rotação
g	Aceleração da gravidade
G	Produção de energia cinética
k	Constante de von Kármán
l, L	Comprimento
P	Pressão, produção
\mathbf{P}	Operador de prolongamento
R	Termo de deformação
\mathbf{R}	Operador de restrição
S	Tensor deformação, termo taxa de redistribuição média
t	Tempo
U	Velocidade media
u	Flutuação de velocidade, velocidade de atrito
V	Velocidade media na direção y
W	Velocidade media na direção z , número de "swirl" característico
x	Posição
y	Posição vertical

Símbolos gregos

α	coeficiente de sub-relaxação, constante de rotação
δ	Delta de Kroenecker
ε	Dissipação de energia turbulenta

ρ	Massa específica
μ	Viscosidade
γ	Coeficiente de difusividade
σ	Número de Prandtl
λ	Constante
κ	Energia cinética turbulenta
E	Permutação
ϕ	grandeza escalar, termo de redistribuição do tensor de Reynolds
τ	tensor sub-malha
ψ	erro

Subscritos

κ	energia cinética
ef	Efetivo
m	Mistura
i,j,k	Índices
sgs	Sub-malha
t	Turbulento

Superscrito

w	Relativo a parede
$+$	Adimensional
\sim	Turbulento
H	Relativo a malha grosseira
T	Transposto