



INVESTIGAÇÃO NUMÉRICA VISANDO A OTIMIZAÇÃO DE SEPARADORES DE ÓLEO E ÁGUA

Marcos Antonio Jangelavicin

PETROBRAS/UN-BC/ST-EIS, Imbetiba, Macaé - RJ, jangelavicin@petrobras.com.br

Marcos Sebastião de Paula Gomes

PUC-Rio/DEPT. ENG. MECÂNICA, 22453-900, Rio de Janeiro - RJ, mospgomes@mec.puc-rio.br

Resumo: *Este trabalho refere-se a uma aplicação em equipamentos de separação do óleo da água produzida em plataformas de produção de petróleo. O trabalho encontra-se atualmente em desenvolvimento e neste artigo serão apresentados resultados parciais já obtidos até o momento. Na produção de petróleo, geralmente são produzidos água e gás juntamente com o óleo. Após a separação da água produzida, a mesma, por estar contaminada com óleo, deve ser tratada para um teor de óleo e graxas apropriado ao descarte. O presente trabalho tem por objetivo principal analisar a influência da geometria na eficiência do equipamento de separação de óleo-água, através da simulação dos campos de velocidade no interior do equipamento (flotador), para diversas geometrias características, com o intuito de otimizar a sua operação. Isto permitirá, entre outras coisas, a reconfiguração interna de equipamentos já existentes e a comparação entre eficiências de equipamentos novos de diferentes geometrias e fabricantes. Para a modelagem numérica é utilizada uma técnica de volumes de controle finitos e são resolvidas as equações de conservação de massa e de quantidade de movimento linear, juntamente com as duas equações do modelo de turbulência k-epsilon, para uma geometria típica de um flotador.*

Palavras Chaves: *Flotadores, Simulação Numérica, Engenharia Ambiental, Poluição Marinha*

1. Introdução

Na produção de petróleo em plataformas marítimas, geralmente são produzidos água e gás juntamente com o petróleo. Este fluxo multifásico proveniente dos poços de produção é encaminhado para uma planta de processamento onde são separadas as três fases presentes nos separadores de produção. Após a separação da água produzida, a mesma, por estar contaminada com óleo, deve ser tratada para um teor de óleo e graxas apropriado ao descarte. Geralmente este tratamento da água produzida consiste de adição de produtos químicos e utilização de equipamentos de separação do óleo da água (hidrociclones e flotadores).

Este trabalho analisará, através da utilização de simulação numérica, o comportamento hidrodinâmico no interior de flotadores para separação do óleo da água, com o objetivo de otimizar a geometria destes equipamentos. Como este trabalho encontra-se atualmente em desenvolvimento, neste artigo serão apresentados resultados parciais já obtidos até o momento.

2. Separação do Óleo da Água

Para a separação do óleo da água produzida, as plataformas têm sido equipadas com hidrociclones e flotadores alinhados em série, além de equipamentos para o tratamento térmico e

químico (Petrobras/UN-BC/ST/EIS,2001). A Fig.(1) mostra uma planta típica de separação óleo-água, de plataformas com projetos mais antigos que não possuíam flutuadores. Esta planta possui separadores de produção que recebem o petróleo produzido e fazem a primeira etapa de separação óleo, gás e água. Após o separador de produção, a água produzida, que está contaminada com óleo, é então encaminhada para os hidrociclones que retiram a maior parte do óleo, e depois passa pelo vaso degaseificador, que retira o gás presente na água e um pouco do óleo ainda remanescente na mesma.

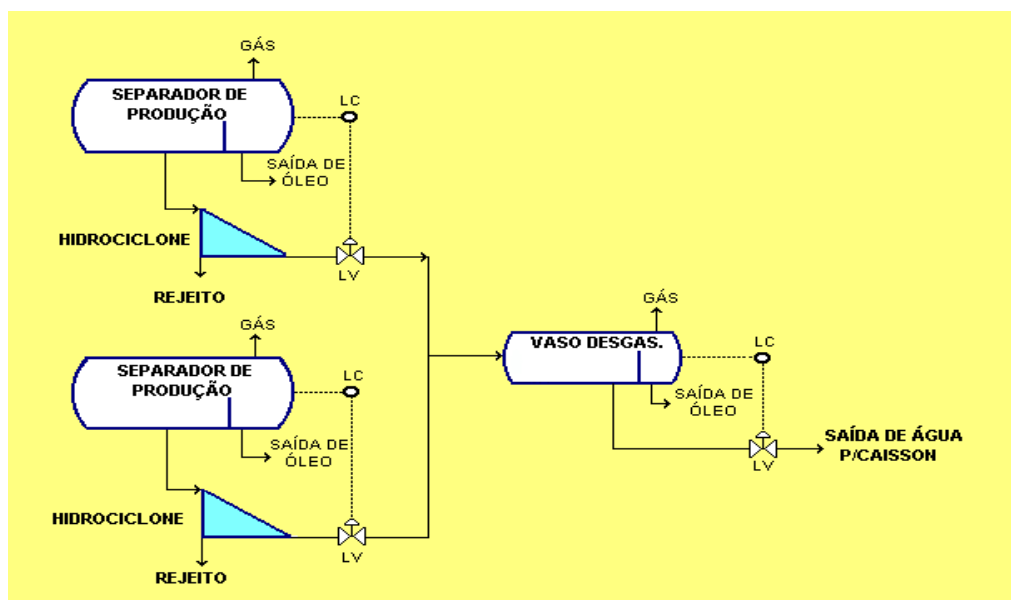


Fig. 1 – Planta de separação de óleo-água com hidrociclones e degaseificador.

Como os vasos degaseificadores apresentavam baixas eficiências para separação de óleo, os mesmos foram adaptados para operarem como flutuadores.

Geralmente a separação do óleo da água envolve duas áreas que interagem: a área da mecânica que envolve os equipamentos e o comportamento hidrodinâmico da água e do óleo nos mesmos; e a área da química que está associada à utilização de produtos químicos e às interações químicas entre a água, o óleo e o gás. Este trabalho estará restrito à área do comportamento hidrodinâmico dos fluidos nos equipamentos, não envolvendo o aspecto químico da separação do óleo da água.

O estudo do comportamento hidrodinâmico dos fluidos nos equipamentos envolve algumas dificuldades, que são devidas principalmente às variações de vazão, ao balanço dos equipamentos acompanhando o balanço de mar em plataformas flutuantes, e à escolha de geometrias de equipamentos e de configurações internas. O comportamento hidrodinâmico é importante, pois a movimentação da massa de água deverá favorecer o direcionamento do óleo para os respectivos coletores. Devido às características da água produzida, do óleo e dos produtos químicos utilizados, há também a formação de borras oleosas. Estas borras, conforme a movimentação dos fluidos no interior dos equipamentos, podem acumular no interior dos mesmos, serem novamente incorporadas a água, ou incorporadas ao óleo. Geralmente é desejável que as borras oleosas sejam incorporadas à corrente de óleo.

Os principais equipamentos de separação do óleo da água produzida após a separação inicial de água óleo são: hidrociclones, flutuadores e tubos de despejo. Este trabalho será desenvolvido em uma geometria específica de um flutuador, mas a metodologia empregada poderá ser aplicada também a outras geometrias e aos demais equipamentos de separação, com alguma adaptação.

Os flotores, geralmente são constituídos de um vaso ou um tanque onde é borbulhado um gás na parte inferior do mesmo. A finalidade do borbulhamento é permitir que as bolhas de gás se associem com as gotículas de óleo facilitando desta forma o movimento ascendente do óleo para a superfície da água. Este processo é conhecido como flotação. Geralmente, este processo é acompanhado por uma injeção de produtos químicos que têm a função de aglutinar as gotículas de óleo, processo conhecido como floculação.

Os principais parâmetros de influência na eficiência do processo de flotação são: quantidade e tamanho das bolhas de gás introduzidas ou geradas no interior do equipamento, geometria do flotor, tempo de residência, qualidade da água a ser tratada e produtos químicos injetados (Bradley, Bryant W., 1987). A qualidade da água está relacionada com: quantidade de óleo na mesma, tamanho das gotículas de óleo e grau de afinidade do óleo com a água. A afinidade do óleo pela água é resultante de agentes emulsionantes que podem ser responsáveis pela formação de emulsões estáveis de óleo em água, difíceis de serem tratadas.

Geralmente, o dimensionamento de flotores para separação de óleo em água em plataformas de produção de petróleo é feito em função de um tempo de residência necessário para o tratamento de determinada água oleosa. O tempo de residência é um parâmetro empírico, proveniente da experiência do fabricante ou do usuário do equipamento, e/ou de testes locais com instrumentos de laboratório, que a princípio não levam em consideração a influência das diferentes configurações geométricas dos equipamentos.

3. Objetivos do Trabalho

A maior motivação para este trabalho originou-se em um projeto de adaptação de um vaso degaseificador, vide Fig. (2). A função original deste vaso era de retirada de gás da corrente de água produzida, e foi adaptado para trabalhar como um equipamento de flotação. Durante o projeto de modificação do mesmo houve a necessidade de conhecer a influência da configuração geométrica do equipamento na eficiência operacional do mesmo.

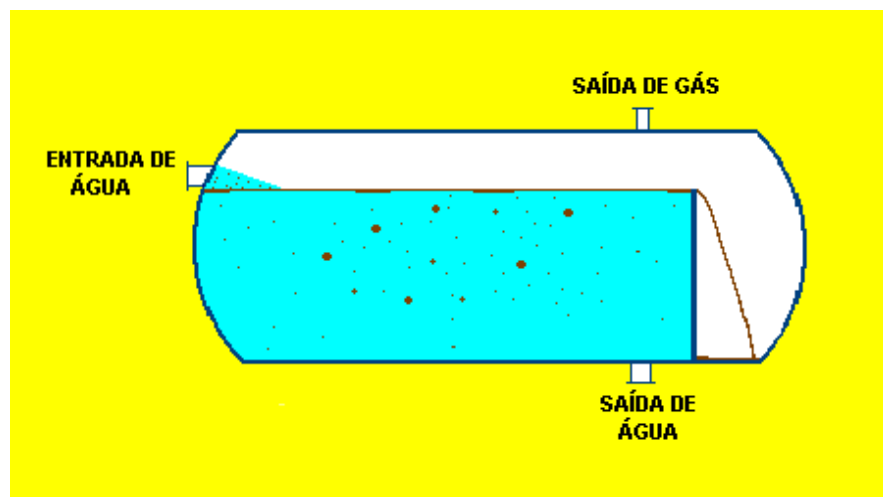


Fig. 2 – Esquema de funcionamento do vaso degaseificador.

Este trabalho pretende analisar, através da utilização de simulação numérica, o comportamento hidrodinâmico no interior de flotores para separação do óleo da água com dois objetivos principais: (i) otimização de equipamentos existentes e (ii) análise de novos equipamentos.

Neste trabalho está sendo analisada a influência da geometria na eficiência de separação do equipamento, através da simulação dos campos de velocidade no interior do mesmo para diversas geometrias características, com o intuito de otimizar a sua operação. Isto permitirá, entre outras coisas, a reconfiguração interna de equipamentos e a comparação de eficiências entre equipamentos novos de diferentes geometrias e fabricantes. Concentrando a análise na influência dos parâmetros geométricos na eficiência de separação, teremos, para uma determinada condição de operação referente às características de bolhas de gás, à qualidade da água e aos produtos químicos adicionados, diferentes eficiências dependentes dos parâmetros geométricos do equipamento.

Para se alcançar o objetivo acima, estão sendo realizadas simulações numéricas em várias geometrias típicas de um separador óleo-água no intuito de se verificar:

- Pontos de recirculação;
- Pontos mortos;
- Pontos com velocidades acima da desejada, comparados com velocidades de gotículas ascendentes de óleo;
- Velocidades superficiais do líquido para se verificar tendências favoráveis ao escoamento do óleo para os coletores ou o acúmulo do mesmo em regiões do equipamento, o que poderá implicar em que o óleo misture-se novamente na água;
- Pontos com geração de turbulências, prejudiciais ao processo de flotação do óleo.
- Destino (coletor de óleo ou saída de água) de gotas de óleo de diferentes diâmetros, o que permitirá uma avaliação da eficiência de separação.

4. Modelagem Numérica

4.1. Metodologia

Para a modelagem numérica é utilizada uma técnica de volumes de controle finitos que resolve as equações de conservação de massa e de quantidade de movimento linear, juntamente com as duas equações do modelo de turbulência k-epsilon (Patankar, 1980), para uma geometria típica de um flotor. Está sendo utilizado o software comercial FLUENT da Fluent Inc. para a simulação (Fluent User's Guide, 2000). A simulação está sendo dividida em três partes:

Uma primeira etapa onde é feita a simulação do escoamento básico (meio contínuo), onde o fluido considerado é a água produzida, e depois adiciona-se óleo, formando uma mistura uniforme na entrada do equipamento:

- a) Simulação do campo de velocidade; fluido = água.
- b) Simulação do campo de velocidade; fluido = mistura óleo-água (simulação Euleriana); separação será estudada apenas considerando-se o efeito de forças de corpo, ou seja, da diferença de densidades.

Na segunda etapa adiciona-se o óleo como uma fase dispersa no escoamento básico da água (fase contínua):

- c) Simulação da fase dispersa, Lagrangiana, onde as gotículas de óleo são liberadas e acompanhadas no escoamento básico da água.

Na terceira etapa será adicionada o gás:

- d) Simulação da fase dispersa, Lagrangiana, onde as bolhas de gás são liberadas e acompanhadas no escoamento básico da água.
- e) Análise qualitativa do cruzamento de trajetórias ente gotículas de óleo e bolhas de gás e dos possíveis efeitos na eficiência de separação.

As simulações são realizadas tendo-se em mente a variação dos parâmetros geométricos relevantes e o efeito que estes possam ter na eficiência de separação óleo-água. Os resultados esperados com o desenvolvimento do presente trabalho deverão permitir a avaliação da eficiência dos flutuadores como função dos parâmetros geométricos.

No estágio atual da pesquisa, foram feitas as simulações da primeira etapa - Simulação do campo de velocidade; fluido = água, e que apresentou resultados interessantes, os quais serão apresentados no item de Resultados.

4.2. Equações e Modelos Matemáticos

Na modelagem numérica, são resolvidas, simultaneamente, a equação da continuidade Eq. (1) e a equação de conservação da quantidade de movimento linear (média temporal) Eq. (2). Neste trabalho está sendo considerado que os fluidos envolvidos (água, óleo e gás) tenham o comportamento de fluidos Newtonianos, regime permanente, propriedades constantes, e que sejam imiscíveis.

Para simular o escoamento turbulento, será utilizada a média temporal das velocidades na equação de conservação da quantidade de movimento Eq. (2,3,4) e será adotado o modelo k-epsilon para turbulência Eq. (5,6,7). Na região da parede será utilizada a *lei logarítmica da parede*. As equações da continuidade e da conservação da quantidade de movimento linear são apresentadas a seguir:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \left(\frac{2}{3} \rho \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho f_i + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho u_i' u_j'}) \quad (2)$$

Onde:

- u_i = componentes da velocidade,
- p = pressão,
- ρ = massa específica,
- μ = viscosidade,
- ρf_i = componentes da força da gravidade,

A Tensão de Reynolds pode ser representada por:

$$\overline{\rho u_i' u_j'} = \rho \frac{2}{3} k d_{ij} - \rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} d_{ij} \quad (3)$$

Onde a viscosidade turbulenta é definida através de:

$$\rho \mathbf{m} = \rho C_m \frac{k^2}{\mathbf{e}} \quad (4)$$

No modelo k-epsilon, duas equações adicionais são necessárias para k = energia cinética turbulenta, e para ϵ = dissipação da energia cinética turbulenta:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\mathbf{rk}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\mathbf{ru}_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mathbf{m}}{\mathbf{s}_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G - \mathbf{re} \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\mathbf{re}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\mathbf{ru}_i \mathbf{e}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mathbf{m}}{\mathbf{s}_e} \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial x_i} \right) + (C_{1e} G - C_{2e} \mathbf{re}) \frac{\mathbf{e}}{k} \quad (6)$$

$$G = \mathbf{m} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

Onde os coeficientes assumem os valores: $C_{1\epsilon} = 1,44$, $C_{2\epsilon} = 1,92$, $C_\mu = 0,09$, $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\epsilon = 1,3$.

4.3. Modelagem das fases dispersas:

O óleo, disperso na água, será simulado em coordenadas Lagrangeanas como sendo uma segunda fase. Será considerado que as gotas de óleo possuem a forma esférica e sua trajetória será acompanhada ao longo do equipamento. Serão utilizadas gotas de diversos diâmetros e será simulado um diâmetro por vez, utilizando um grande número de gotas. A contagem da quantidade de gotas que ao chegarem em seu destino final, câmara de óleo ou saída de água tratada, permitirá avaliar a eficiência de separação para cada diâmetro de gotas.

A simulação do óleo será considerada desacoplada do escoamento da fase contínua, ou seja, o escoamento do óleo não influenciará o campo de velocidades da água. O balanço de forças por unidade de massa Eq. (8), atuando na partícula em coordenadas cartesianas pode ser escrito como:

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\mathbf{r}_p - \mathbf{r})}{\mathbf{r}_p} + F_x \quad (8)$$

Onde: $F_D(u_p - u)$ é a força de arraste gerada pela diferença entre a velocidade da gotícula e aquela do escoamento, u_p é a velocidade da gotícula, e F_x é a força para acelerar o fluido na vizinhança da gotícula. Esta última corresponde à força de massa virtual e é diferente de zero quando a gotícula atravessa regiões com velocidades diferentes (equivale a uma situação de escoamento transiente ao redor da gotícula). Temos também as expressões pra F_D Eq. (9) e para Re Eq.(10):

$$F_D = \frac{18\mathbf{m}}{\mathbf{r}_p D_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (9)$$

$$Re = \frac{\mathbf{r} D_p |u_p - u|}{\mathbf{m}} \quad (10)$$

Onde ρ_p representa a massa específica da fase dispersa (gotícula), D_p é o diâmetro da gota de óleo, e Re representa o número de Reynolds baseado na velocidade relativa entre gotícula e a fase contínua.

A modelagem do gás também será efetuada em coordenadas Lagrangeanas como uma terceira fase. Também será considerado que as bolhas de gás possuem a forma esférica e suas trajetórias

serão acompanhadas ao longo do equipamento. Serão utilizadas bolhas de diâmetro uniforme. A simulação do gás será considerada acoplada ao escoamento da fase contínua, ou seja, o escoamento do gás influenciará o campo de velocidades da água. O balanço de forças por unidade de massa, atuando na partícula, em coordenadas cartesianas, é dado pelas equações acima.

Nesta fase do trabalho não será considerado o efeito das bolhas de gás agindo diretamente sobre as gotas de óleo, ou seja, não será considerado o efeito das bolhas de gás se aglutinando com as gotas de óleo e aumentando a velocidade de ascensão das mesmas. Também não será considerada a existência de emulsões de óleo em água que não se separam por efeito gravitacionais, necessitando o uso de produtos químicos. Estes efeitos serão avaliados de forma indireta e aproximada, através da introdução de uma densidade aparente média para as gotas de óleo. Nesta fase do trabalho é necessária esta simplificação, pois a interação entre as bolhas de gás e as gotas de óleo, bem como sua influência no escoamento da fase contínua é bastante complexa e merece um estudo específico a parte.

Pretende-se que a densidade aparente média seja um parâmetro empírico que ajustará a eficiência da simulação com a eficiência real do equipamento. Para obtenção da densidade aparente média será feita uma medição da quantidade e distribuição de tamanho de gotas na corrente de óleo antes e depois do flutuador. Com estas medições poderemos estabelecer uma eficiência de separação para cada faixa de tamanho de gotas. Utilizando-se estas informações como dados de entrada durante a simulação do equipamento, considerando-se ainda os mesmos parâmetros geométricos, a densidade do óleo será ajustada, para cada faixa de diâmetro de gotas, até que a eficiência de separação seja semelhante àquela obtida experimentalmente. Se as densidades aparentes para cada faixa de tamanho de gotas forem semelhantes, será utilizada uma única densidade aparente média para todos os diâmetros de gotas. Caso sejam muito diferentes será utilizada uma densidade aparente média para cada faixa de diâmetros.

4.4. Geometria do equipamento e malha utilizada

Neste trabalho apresenta-se o estudo da simulação hidrodinâmica em um vaso degaseificador que foi transformado em flutuador. No contexto deste trabalho, o interesse concentra-se nas modificações dos internos que afetam o escoamento dos fluidos. As principais modificações foram: aumento da altura do vertedouro de óleo, colocação de tubos borbulhadores de gás, e construção de um distribuidor na entrada de líquido, vide Fig. (3).

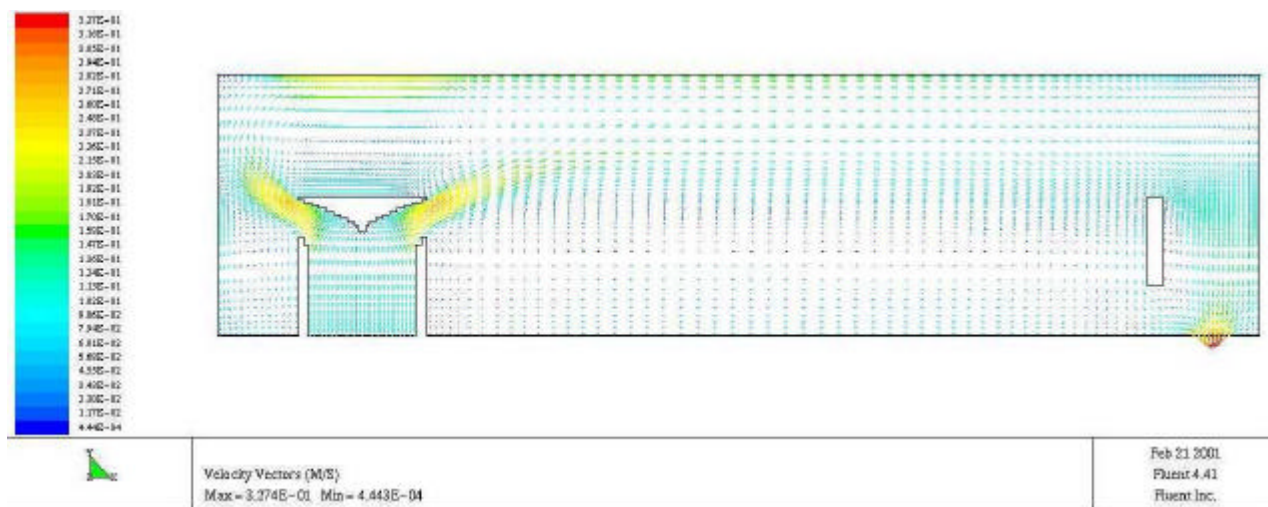


Fig. 3 – Campo se velocidades da água no interior do vaso degaseificador que foi adaptado para flutuador. Entrada de água pelo lado esquerdo na parte inferior, saída de água no lado direito na parte inferior e vertedouro de óleo no lado direito na parte superior.

Numa primeira simulação, foi utilizado um sistema de geração de malhas cartesianas em 2D, com domínio computacional de 120 x 40 volumes de controle Fig. (3). Posteriormente foi utilizado um sistema de malhas não estruturadas 3D Fig. (4). As malhas foram refinadas junto às paredes, interface líquido e gás e na região do distribuidor. O domínio computacional utilizado foi de aprox. 400.000 volumes de controle, que convergiu com resíduos da ordem de 10E-06, com aprox. 2.500 iterações.

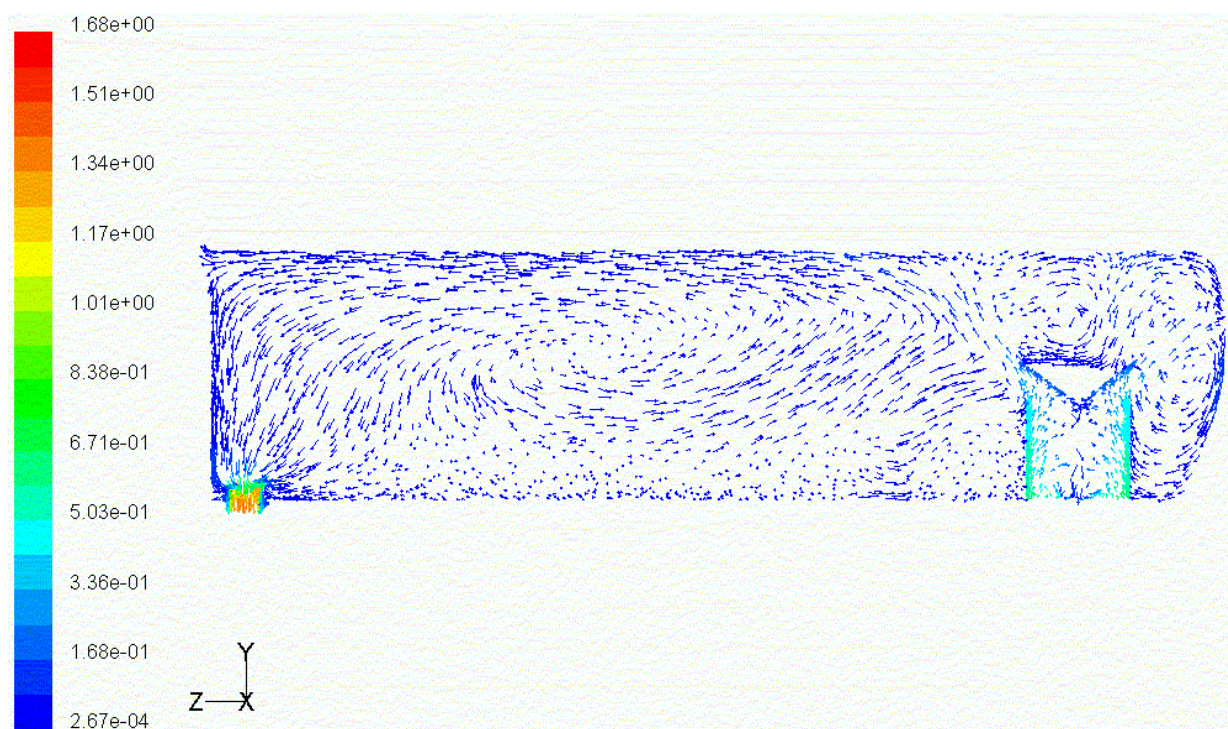


Fig. 4 – Campo se velocidades da água. Entrada de água pelo lado direito na parte inferior, saída de água no lado esquerdo na parte inferior e vertedouro de óleo no lado esquerdo na parte superior.

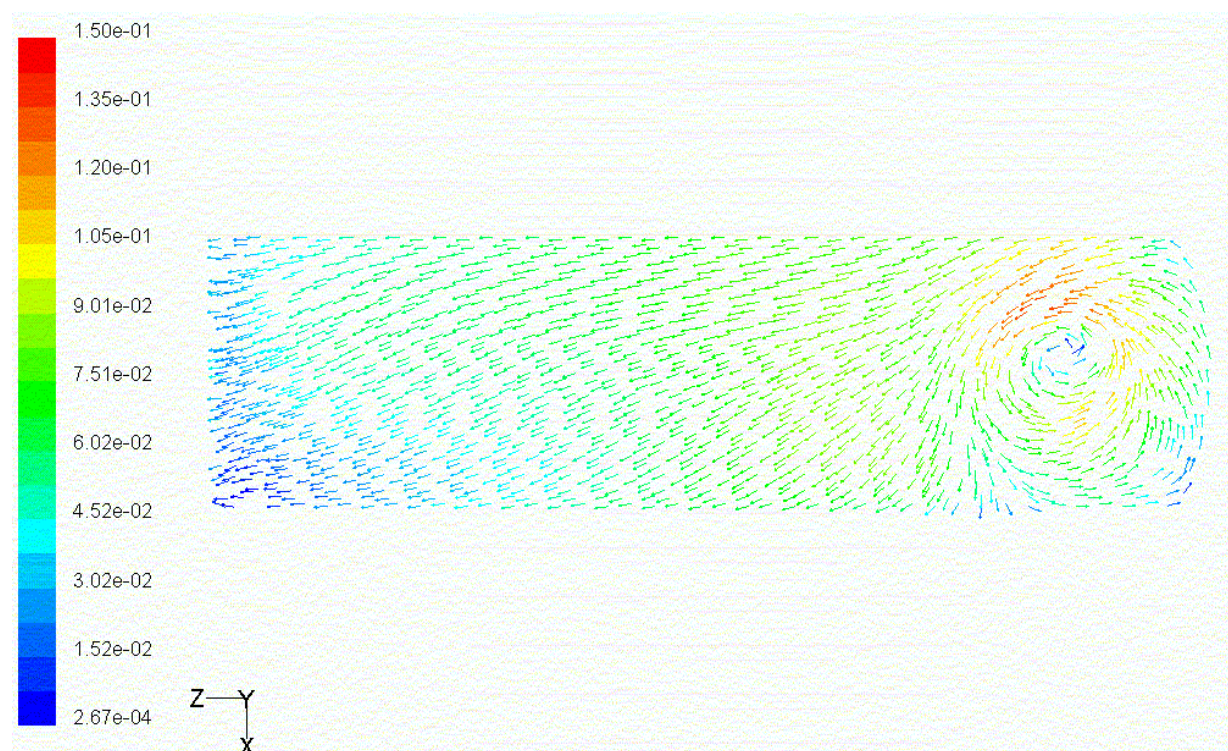


Fig. 5 – Campo se velocidades da água, vista superior, mostrando o plano da interface. A saída de óleo está à esquerda.

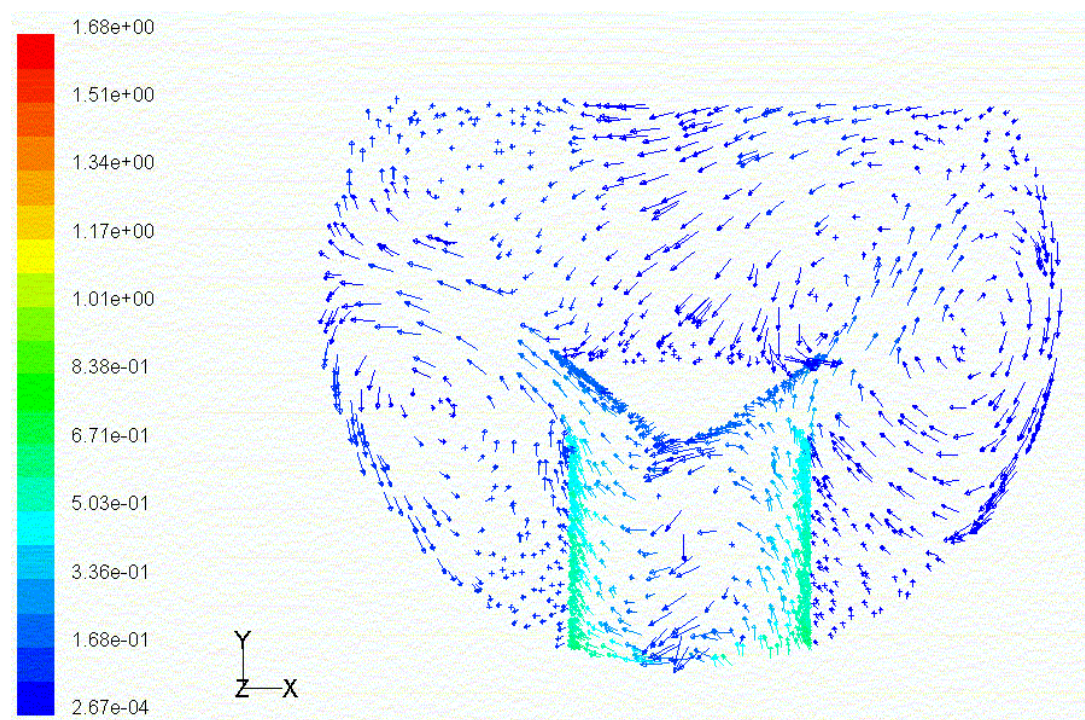


Fig. 6 – Campo se velocidades da água, corte transversal na região do distribuidor de entrada.

5. Resultados Preliminares

a) Que a direção e o sentido da velocidade da água próximo da superfície do líquido favorece o recolhimento do óleo na câmara de óleo, este resultado foi obtido na simulação 2D Fig. 3, e confirmado na 3D, Fig. 4 e 5. Este efeito é coerente com os resultados de operação do equipamento, já que o mesmo possui boa eficiência de coleta do óleo.

b) Na simulação 2D foi verificado a existência de uma grande recirculação ao longo de praticamente todo o comprimento da câmara de água Fig. 3. Após a simulação 3D, verificou-se que esta recirculação ocorre apenas em uma região da câmara de água Fig. 4. Esta recirculação na prática tem um efeito indesejável de diminuir o tempo de residência útil do vaso, pois diminui a seção para escoamento da água na direção da saída na seção transversal do vaso, ocasionando aumento de velocidade da água. A grande recirculação da simulação 2D, produzia no fundo do vaso um movimento no sentido da entrada do vaso, favorecendo que sólidos e borras oleosas ao sedimentarem tendam a acumular no interior do equipamento. Este recirculação também é coerente com observação de campo antes da modificação do vaso, pois o mesmo acumulava grande quantidade de borras oleosas em seu interior. Na simulação 3D, não ocorre o movimento no fundo do vaso na direção da entrada, mais sim um movimento em direção à saída. Não dispomos ainda de informações de campo sobre o acúmulo das borras depois da modificação do equipamento.

c) Verifica-se a formação de diversas recirculações no interior do equipamento Fig. 4 e 6. Um melhor posicionamento e dimensionamento do distribuidor de entrada, ou a colocação de chicanas no interior do equipamento poderiam minimizar a quantidade e dimensão das recirculações,

umentando o tempo de residência efetivo, o que contribuirá para melhoria da eficiência do equipamento.

6. Comentários

Apesar das simulações ainda não estarem concluídas, a simulação numérica do escoamento mostrou ser uma ferramenta adequada na identificação dos fenômenos que ocorrem no interior do equipamento e que pode ser utilizada para que se obtenha uma melhora de desempenho visando a otimização do mesmo. Os resultados apresentados no item anterior indicam que o modelo numérico corresponde à algumas situações observadas na prática, e que serve como indicação da qualidade da previsão.

7. Referências

- Bradley, Bryant W., 1987, "Two Oilfield Water Systeem", Robert E. Krieger Publishing Compay, Malabar, Florida, pp. 183-199.
- Deschamps, César J., 1998, "Modelos Algébricos e Diferenciais", I Escola de Primavera – Mini Cursos, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 121-138.
- Fluent, "User's Guide", Version 5, chapters 1, 5, 8, 9, 14.
- Patankar, Suhas V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Publishing Corporation, McGraw-Hill Book Company.
- Petrobras/UN-BC/ST/EIS, 2001, "Manual de Tratamento de Efluentes Líquidos", pp. 2-20.

Numerical Simulation for Optimizing Oil - Water Separators

Marcos Antonio Jangelavicin

PETROBRAS/UN-BC/ST-EIS, Imbetiba, Macaé - RJ, jangelavicin@petrobras.com.br

Marcos Sebastião de Paula Gomes

PUC-Rio/DEPT. ENG. MECÂNICA, 22453-900, Rio de Janeiro - RJ, mospgomes@mec.puc-rio.br

***Abstract:** This paper refers to an application of oil-water separation equipments in offshore production platforms, and presents partial results of the developments obtained until now. In production facilities, water and gas are generally produced with the oil. As the produced water, after separated from the oil, is still contaminated, it needs to be treated in order to produce an oil and grease content suitable for discharge in the sea. The main objective of this paper is to analyze the influence of the geometry in the efficiency of an oil-water separation equipment, by means of the numerical simulation of the velocity fields inside the equipment (flotator), for several different geometries, with the purpose of optimization. Among other things, the simulator will allow the retrofit or upgrade of the internals of an existent equipment, and the comparison between different geometries and manufacturers. A technique of finite control volumes is used in the numerical simulations, and the equations of conservation for mass and momentum are solved together with the two equations of the turbulence k-epsilon model, for the typical geometry of a flotator.*

***Keywords:** Flotators, Numerical Simulation, Environmental Engineering, Marine Pollution*