

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

CFD com controle aplicado na modelagem de um separador gás-líquido em linha.

AUTORES:

L. B. Resende, A. Plucenio, D. J. Pagano.

INSTITUIÇÃO:

Departamento de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina.

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 5º PDPETRO, realizado pela a Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 15 a 22 de outubro de 2009, em Fortaleza-CE. 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 5ºPDPETRO.

TÍTULO DO TRABALHO

CFD com controle aplicado na modelagem de um separador gás-líquido em linha

Abstract

CFD (Computational Fluid Dynamics) is a technique that has application in several segments of the industry, especially in the petroleum and gas industry. Its use allows to conceive structures and to project fluid dynamic simulation to optimize different objectives. However, there is a predominance for permanent regime or pseudo permanent regime solutions that in some cases are not enough to answer the main questions of the project.

This article presents an application of the software for fluid dynamics simulation, CFX. It is used here with applied active control in the modeling of a geometry for an inline gas-liquid separation. This geometry is part of a structure that aims to obtain the measurements of the gas, oil and water flow rates, after the inline phase separation.

This work is part of a research project whose objective is the development of a low cost equipment for the measurement of the flow rates of water, oil and gas in a multiphase flow. This equipment will be implemented in the Multiphase Flow Experimental Unit (UEEM), which is being built in the Automation and Systems Department of the Federal University of Santa Catarina.

The conception of a gas-liquid separation geometry is confronted with the challenge of obtaining a structure with small dimensions and great inline separation capacity for a certain range of entrance flow rate. At the same time, we have the challenge of maintaining the gas-liquid interface in a certain level in order to avoid it to reach the extremities of the tank, making the liquid to go out in the gas exit or vice-versa.

To maintain the interface at the desired level it is necessary to introduce the behavior of a valve with its controller, acting in the flow of the liquid exit. So, we have an integrated and completed project of the separator aiming the best performance possible.

This article presents the simulation results and conclusions of the application of the technique proposed.

Introdução

A medição da vazão das fases de água, óleo e gás de um escoamento multifásico permite a otimização de diversas atividades realizadas na produção de petróleo. O conhecimento das frações produzidas por cada poço é de fundamental importância em qualquer esforço para se melhorar o fator de recuperação de reservatórios, dar simplicidade e robustez para o controle de processos de elevação artificial e facilitar testes de produção de poços.

Hoje pode-se encontrar no mercado medidores multifásicos que realizam a medição da vazão de cada uma das fases sem separação e com baixa perda de carga. Entretanto o preço desses medidores é ainda muito elevado. Além disso, os medidores multifásicos produzidos no exterior não contemplam de forma específica as características do óleo produzido em águas profundas na costa brasileira.

O projeto e implementação de um equipamento para a medição de vazões de água, óleo e gás utilizando um separador parcial em linha proporcionará realizar a medição de vazão destas substâncias de forma simples, barata e com baixa perda de carga. Esta tecnologia vem para substituir os caros e complexos medidores multifásicos usados atualmente.

Está sendo desenvolvido, no Departamento de Automação e Sistemas (DAS) da Universidade Federal de Santa Catarina, uma Unidade de Experimentação em Escoamento Multifásico (UEEM). O objetivo de sua construção é o desenvolvimento de soluções de baixo custo para medição multifásica, através da realização de escoamentos multifásicos, pesquisas de medição, controle e instrumentação.

A Figura 1 mostra um esquema da localização da UEEM. A unidade é composta por duas partes principais: uma Casa de Utilidades, onde ficam os equipamentos (bombas, compressores, separadores), e o Laboratório de Medição de Escoamento Multifásico, onde ocorrem as medições de vazão das fases individuais e do escoamento multifásico.

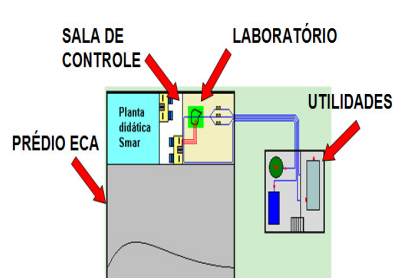


Figura 1 – UEEM

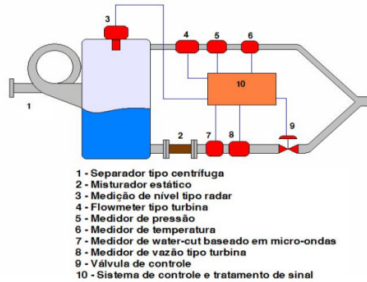


Figura 2 - Skid

Na parte do laboratório está sendo desenvolvido um Skid responsável pela separação e medição em linha de cada uma das fases do petróleo. Na figura 2 acima temos representado o skid. Ele é composto inicialmente por uma estrutura de separação líquido-gás (Item 1) que apresenta duas saídas: Inferior (Saída Líquido) e Superior (Saída Gás). Na saída de líquido teremos um misturador (2) que vai permitir a medição da fração de água (7) do escoamento líquido. São feitas medições das vazões com medidores tipo turbina (4 e 9). Medições adicionais de pressão (5) e temperatura (6) serão utilizadas na linha de gás para transformar a medição volumétrica em vazão mássica ou vazão volumétrica a pressão e temperatura padrão.

A estrutura de separação gás-líquido em linha que integra o skid (Item 1 da figura 2), doravante denominada “Separador”, será o foco deste trabalho. Esse projeto portanto visa o desenvolvimento de uma estrutura responsável por fazer a separação em linha do gás do líquido constituintes do petróleo. Esta estrutura deve ser simples, barata, possuir pequenas dimensões e alta qualidade de separação.

Para isto é proposto uma geometria em forma de um loop (ver Item 1 da figura 2), doravante denominada “Centrífuga” contendo um tanque na sua saída. Na entrada da Centrífuga temos a mistura gás-líquido e na saída é acoplado um tanque. Este, por sua vez, possui duas saídas: uma superior para a saída de gás e uma inferior para a saída de líquido. O princípio de separação é por força centrípeta que faz com que a água seja lançada para baixo e o ar seja lançado para cima. No tópico “Metodologia” teremos mais detalhes de seu funcionamento e construção.

Metodologia

Para o desenvolvimento deste trabalho, inicialmente foi feita um treinamento na utilização do Software CFX com um curso em São Paulo e mais um extenso treinamento autodidata usando tutoriais, informações na internet e outras bibliografias. Em seguida foi feito um estudo da problemática do escoamento multifásico para um melhor entendimento desse fenômeno.

Com as ferramentas em mãos, iniciou-se o trabalho para o desenvolvimento do Separador. Pode-se dividir em 3 etapas: Concepção de geometrias, Criação de malhas e Simulações fluido-dinâmicas. Trata-se de um ciclo e não de uma sequência que termina na simulação, pois ao verificar os resultados

faz-se necessário a concepção de uma nova geometria, ou nova malha, ou novas configurações de simulação para obter um melhor resultado.

Primeira etapa: Concepção de geometrias

Através da ferramenta de CAD, Design Modeler, contida no pacote CFX, foram desenvolvidas diversas geometrias. Primeiramente foi desenvolvido uma estrutura para servir como comparadora, como base para validar a eficácia do separador que está sendo proposto. Esta geometria é um duto de 44.3 mm de diâmetro e 50 cm de comprimento acoplado a um tanque de 60 cm de altura e 40 cm de diâmetro. Na saída do tanque (lado oposto à entrada) temos dois escapes com formato cilíndrico e diâmetro 44.3 mm: um escape (saída) superior que está à 4 cm abaixo do topo do tanque e um escape inferior à 4 cm acima do fundo do tanque.

O objetivo desta estrutura é ver qual o grau de separação gás-líquido é possível obter somente fazendo uso da lei da gravidade, já que nela não incluímos a Centrífuga ainda.

Em seguida foi incluído a Centrífuga a esta estrutura comparadora, afim de obtermos uma maior eficácia na separação gás-líquido. A Centrífuga é inclusa no lugar do tubo de 50 cm para que, através do princípio físico da força centrípeta, o líquido seja “empurrado” para sua parede externa e assim saia desta na parte inferior, direcionando-se para a saída de líquido. O gás por ser bem mais leve, é pouco influenciado pela força centrífuga e quase não é “empurrado” para a parede externa, saindo da Centrífuga na parte superior.

Após várias modelagem e simulações, a Centrífuga final proposta apresenta as seguintes características e dimensões: formato de looping circular de raio 8 centímetros, diâmetro de 44.3 mm e um cone de diâmetros 44.3 e 66.5 mm nas suas extremidades acoplado na sua saída. Este cone é interessante para facilitar ainda mais o direcionamento do líquido para a parte inferior.

O critério para a escolha do diâmetro de entrada do separador será explicado mais a frente na etapa “Simulação fluido-dinâmica”.

Segunda etapa: Criação de malhas

A malha, ou malha de controle, é uma discretização da geometria. É a divisão da geometria em diversos (quantos necessários) volumes de controle, onde serão realizados os cálculos pelo processador do CFX (Solver). Deve-se encontrar o ponto ótimo do tamanho dos volumes de controle, pois eles não podem ser nem muito pequenos e nem muito grandes. Se muito pequenos, teremos uma simulação muito lenta e se muito grandes, uma simulação pouco exata que pode até divergir (não conseguir chegar a solução). O ponto ótimo é aquele em que a simulação ocorra de forma rápida, exata e convergente.

Para o Separador foi desenvolvido uma malha da ordem de 120 mil pontos. Na entrada, na centrífuga e nas saídas temos estruturas de menores dimensões e que exigem maior exatidão de cálculos. Assim, foi colocado uma malha mais fina nestas regiões. O tanque, por sua vez, possui dimensões maiores e também não precisamos de tanta exatidão no seu domínio. Portanto, foi colocada uma malha mais esparsa para o mesmo.

Terceira etapa: Simulação fluido-dinâmica

Após termos concebido as geometrias e suas malhas de controle estamos aptos a realizar a simulação do escoamento de petróleo nas mesmas. Esta simulação fluido-dinâmica é dividida nas seguintes etapas: Pré-processamento, Processamento e Pós-processamento.

Pré-processamento

Para o Pré-processamento é utilizado a ferramenta CFX-Pre. Esta etapa é responsável pelas definições de condições de barreira (entrada e saída), fluidos a serem utilizados, expressões a serem calculadas, turbulência envolvidas, condições iniciais, interação entre fluidos, critérios de convergência, período de amostragem, etc.

Para efeito de simplificação da simulação foram utilizados como fluidos a água (997 kg/m^3) para representar o líquido (óleo e água) e gás de densidade 1.185 kg.m^{-3} para representar o gás do petróleo. Temos como condições iniciais a presença de água a uma altura de 30 centímetros no tanque e gás nos outros 30 centímetros.

A velocidade/vazão de entrada do fluido deve estar dentro da faixa de valores de 0 a $20 \text{ m}^3/\text{h}$, pois é a vazão que a UEEM foi especificada para impor. Além disso, a vazão de entrada influencia na desempenho da centrífuga e na qualidade de separação. Se for muito baixa, o fluido não consegue atravessar a centrífuga e se for muito alta, o equipamento apesar de conseguir centrifugar bem, não consegue separar bem o gás do líquido no tanque. Assim foi adotada a estratégia de impor a velocidade mínima para que o fluido passe pela Centrífuga. Esta é obtida pela seguinte expressão:

$$Ec_{in} = Ep_{topo} + Ec_{minloop} + Fat \quad , \text{ na qual,}$$

Ec_{in} = Energia cinética mínima de entrada para o fluido atravessar o loop sem tombar.

Ep_{topo} = Energia potencial do centro do duto até o centro do topo do loop. Energia necessária para o fluido sair base e chegar no topo do loop.

$Ec_{minloop}$ = Energia cinética correspondente à velocidade mínima do fluido no topo do loop. A velocidade mínima é obtida igualando o peso à força centrípeta.

Fat = Forças de atrito. Atrito com a parede do duto, atrito entre fluidos, etc.

Com essa relação, temos que a velocidade de entrada mínima deve ser $1,8 \text{ m/s}$. Para termos a liberdade de implementar perturbações e variar a ação de controle, é atribuído como vazão de entrada um valor intermediário entre o permitido: $10 \text{ m}^3/\text{h}$. Assim, obtemos o valor do diâmetro do duto, através da relação $V = v \cdot A$, na qual 'V' é a vazão volumétrica, 'v' é a velocidade e 'A' é a área da seção do duto. Assim temos que o diâmetro do duto deve ser de 44.3 mm . Outra possibilidade, se quisermos diminuir a vazão de entrada ou aumentar o diâmetro do duto, é colocar a entrada da estrutura na mesma altura do topo da centrífuga fazendo assim com que o fluido tenha inicialmente além de energia cinética, energia potencial em relação à base da centrífuga. Nesta nova configuração, a velocidade de entrada passa a ter que ser de 0.886 m/s ao invés de 1.8 m/s . Essa velocidade nos permite um diâmetro de 63.2 mm para uma vazão de $10 \text{ m}^3/\text{h}$ ou de uma vazão de $4.92 \text{ m}^3/\text{h}$ para o diâmetro de 44.3 mm .

Para dar mais realismo a simulação, foram colocadas entradas variáveis também. Foram simulados escoamento do tipo golfada, colocando uma entrada do tipo cosseno que produz uma variação de 40% em torno de um ponto médio; Colocou-se também bolhas de gás com diâmetro variável e graus de perturbação.

A saída de gás foi colocada aberta à atmosfera e a saída líquido representará uma válvula (com dinâmica desprezada) que controla a vazão de saída de acordo com a estratégia de controle.

Foram implementadas algumas expressões para serem monitoradas, ou seja, analisar sua evolução ao longo do tempo: Fração volumétrica de gás na Saída Inferior; Fração volumétrica de Água na Saída Superior; Diferencial de pressão; Altura da interface líquido-gás e Vazão mássica na saída inferior.

As frações volumétricas de gás nos dizem quantos por cento do volume de gás está saindo indevidamente na saída Inferior (saída líquido). E o análogo vale para a água. O diferencial de pressão (dp) mede quanto varia a pressão por intervalo de altura. Para este cálculo foi necessário a inclusão de 25 pontos de medição espaçados 4 centímetros entre si. Assim, o dp mede o quanto varia a pressão a cada 4 centímetros de altura. É sabido que na interface temos um alto e variado diferencial de pressão. Isso é usado para calcular a altura da interface. O ponto que estiver mais próximo do dp de 6000 N/m³ (obtido experimentalmente) definirá a altura da interface. Assim temos uma medição com erro de no máximo 4 cm, o que é aceitável frente ao tamanho do tanque e dinâmica lenta do nível. A medição poderia ter sido feita baseada no valor de pressão no fundo do tanque, o que nos leva a obtenção de altura. Esta estratégia porém é restrita para uma interface bem definida e dois fluidos apenas. Como será incluído óleo em uma segunda instância e a interface normalmente não está bem definida a primeira estratégia, mesmo com o erro de 4 cm torna-se mais atrativa.

Foi definido um período de amostragem de 0.5 segundos. Ele foi obtido experimentalmente, obtendo-se o maior valor para que o sistema convirja com resíduo de 10^{-4} .

Processamento

Para o processamento é utilizado a ferramenta CFX-Solver. Nela são realizados cálculos de todas as variáveis do sistema para cada um dos 120000 pontos da malha de controle. Enquanto calcula, podemos monitorar tanto a convergência de seu processamento quanto a evolução das expressões que foram definidas no pré-processamento, o que nos possibilita fazer uma análise do regime transitório.

Pós-processamento

Para o pós-processamento é utilizado a ferramenta CFX-Pós. Nesta somos capazes de visualizar e analisar os resultados a nível de regime permanente. Foi utilizado principalmente para validar a simulação, atestar se a centrífuga estava se comportando como projetado e visualizar a interface líquido-gás.

Resultados e Discussão

Com a geometria proposta (figura 3) conseguiu-se separar (em testes de simulação bem sucedidos), a fase líquida da fase gasosa da mistura água-gás com média de 98% de eficácia. Foram gerados gráficos que monitoram a cada instante de tempo amostrado como está a fração volumétrica de água na saída superior e a fração de ar na saída inferior. Abaixo temos as figuras do Separador proposto (figura 3), da estrutura de comparação (Comparador. Figura 4) e o gráfico de evolução das frações volumétricas para o Separador (figura 5) e para o Comparador (Figura 6).

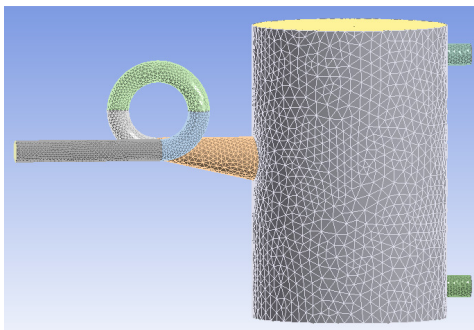


Figura 3: Separador

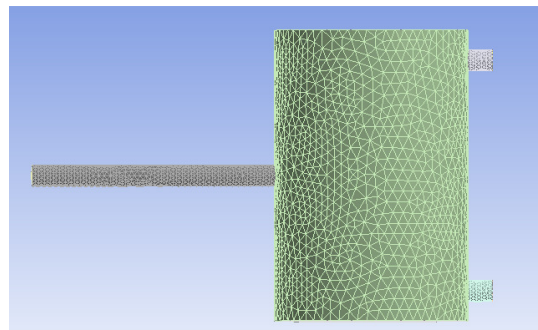


Figura 4: Comparador

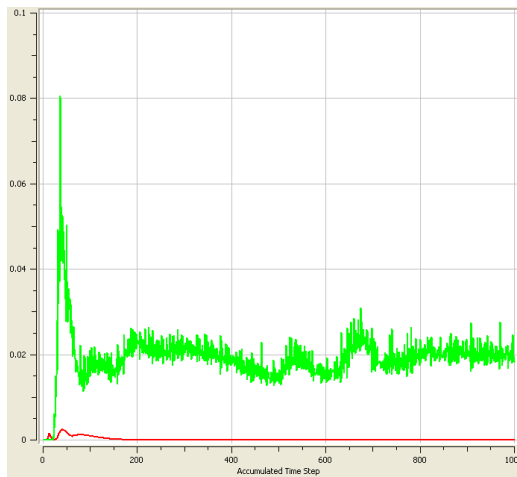


Figura 5- Fração volumétrica Centrífuga
Verde: Frac. Vol gás saída inferior
Vermelho: Frac. Vol. água saída superior

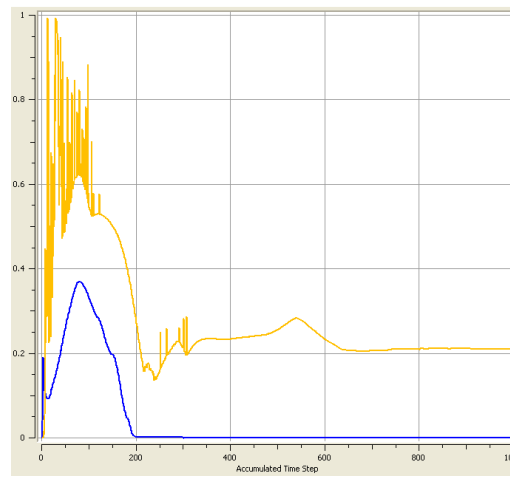


Figura 6 - Fração vol. Comparador
Amarelo: Frac. Vol gás saída inferior
Azul: Frac. Vol. água saída superior

Esse gráfico é o resultado para um escoamento do tipo golfada com vazões na faixa de 6 a 14 m³/h, com o diâmetro da bolha de gás variando de 50 a 250 microns. Em verde temos fração de ar na saída inferior e em vermelho a fração de água na saída superior. Para um escoamento do tipo laminar o comportamento é melhor ainda: 99,5% de eficácia. A estrutura sem a centrífuga apresentou um desempenho bem pior: em média 80% para escoamento laminar, validando a eficácia do separador proposto.

Foi implementado com sucesso um controle do tipo proporcional que mantém a altura da interface no valor desejado, respeitando as limitações de vazão da válvula de saída. A escolha do controle proporcional é pelo fato de não haver necessidade de haver erro nulo de seguimento a referência. Ou seja, o nível não precisa necessariamente estar no nível desejado. Ele pode variar 10 cm para baixo ou para cima que ainda teremos um ótima separação. A lei de controle implementada possui a seguinte fórmula:

$$\text{VazãoSaída} = \text{VazãoOffset} + \text{Ganho} * \text{Erro} \quad , \text{ na qual,}$$

VazãoSaída: vazão mássica que a válvula que controla a saída inferior deve imprimir em kg/s;

VazãoOffset: vazão média de entrada em kg/s;

Ganho: Ganho proporcional. Seu valor é de $-10 \frac{\text{kg}}{\text{m.s}}$;

Erro: Diferença entre valor desejado (href) e valor atual da altura (h) em m.

A dinâmica da válvula, devido a dificuldade de implementação no CFX, foi desprezada. Trata-se de uma aproximação razoável pois a dinâmica do nível do tanque é mais que 10 vezes mais lenta do que a da válvula. Abaixo os gráficos da evolução da altura, vazão de saída e diferencial de pressão.

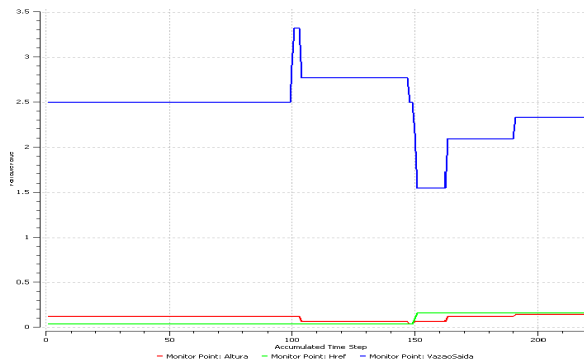


Figura 7 - Vazão (Azul), href (verde), h (vermelho)

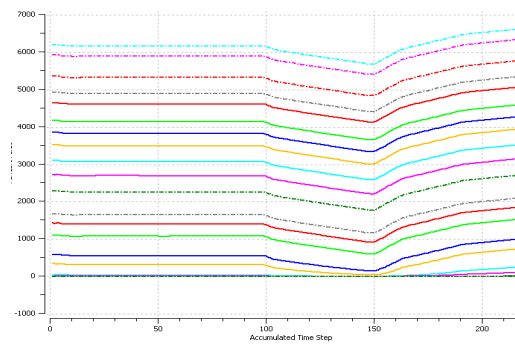


Figura 8 - Diferencial de pressão

Resultado de regime permanente

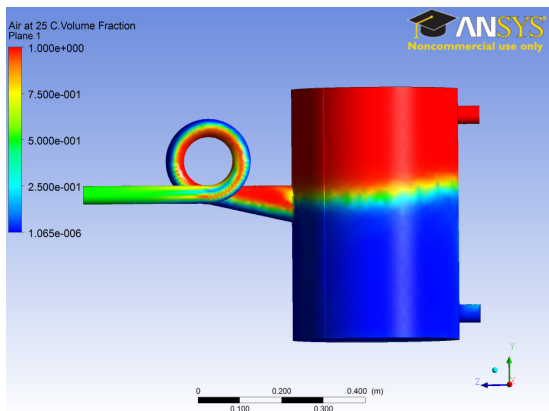


Figura 9 - Fração vol. do gás Comparador

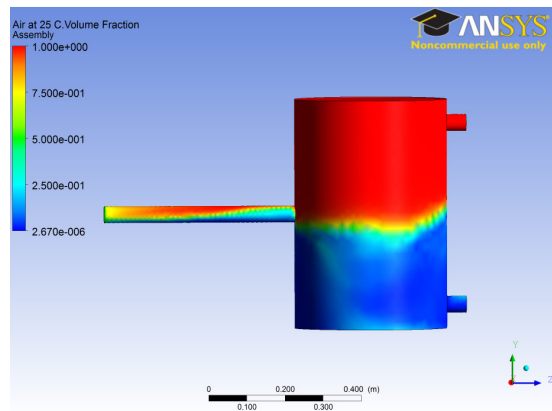


Figura 10 – Fração vol. do gás Centrífuga

Temos em regime permanente o resultado apresentado na figura 9 e 10 acima. Nelas é representada a fração volumétrica do gás, em que vermelho representa 100% de gás e azul escuro representa 0%, ou seja, 100% de água. Nota-se que a água está sendo empurrada para a parede da Centrífuga e é lançada para baixo, enquanto que no Comparador parte do gás vai para a saída inferior indevidamente. A interface se mantém em um nível médio de interesse.

Conclusões

Conclui-se que é possível desenvolver um separador líquido-gás composto por uma “centrífuga” de um loop integrada a um tanque. Foi conseguido um separador com pequenas dimensões, simples, barato e com ótima qualidade de separação pois foi necessário um tanque de apenas 60 cm de altura, com uma estrutura simples de separação (1 loop), enquanto separadores gás-líquido existentes no mercado precisam de mais de 3 metros de altura e estruturas mais complexas e mais caras.

Estas pesquisas poderão conduzir novas tecnologias relacionadas à área, trazendo inovações para a medição de escoamento multifásico e aumentando consequentemente a participação da indústria nacional na área de controle, automação e instrumentação para o setor de petróleo e gás.

Este projeto está em fase de desenvolvimento. Ainda há de ser desenvolvido:

Testes adicionais de desempenho;

Inclusão da dinâmica da válvula para dar mais realismo ao controle;

Inclusão de óleo para finalmente termos uma mistura trifásica;

Definição da instrumentação adequada para o controle do processo;
Desenho do separador e toda instrumentação de controle em um software CAD;
Construção de um protótipo do sistema em aço inox;
Testes na unidade de Experimentação em Escoamento Multifásico (UEEM);
Integração com o sistema de medição de fração de água em desenvolvimento.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço o suporte da ESSS que respondeu a várias de minhas dúvidas sobre o software CFX. Aos colegas de trabalho Cleiton Moya e Murilo Castro que me auxiliaram no início do projeto. Agradecimentos ao Programa de Recursos Humanos PRH 34 ANP/MCT e seus professores integrantes pela oportunidade de desenvolvimento desta pesquisa e oferecimento de toda a infraestrutura. Por fim, agradeço os colegas de laboratório e PRH-34 Cudas, Traple, Gonzaga, Luiz Henrique, Paulo, Caio, Eduardo, Marcela, Mariana, Gabriel, Alissom, Bárbara, Priscila, Poliana e Renata pelos momentos de descontração no dia-a-dia.

Referências Bibliográficas

- [1] Ansys CFX Tutoriais.
- [2] Ansys CFX Introdutório.
- [3] <http://www.cfd-online.com>.
- [4] C. M. de Almeida, “Relatório de Estágio de Sétima Fase”, 2009.
- [5] L. B. Resende, “Plano de Trabalho de Bolsista”, PRH-ANP/MCT no 34, 2008.
- [6] Petrobras, “Óleo Industrial OB”