

Estudo do escoamento em um separador tubo-ciclônico de instalação no fundo do um poço de petróleo através da fluidodinâmica computacional

Edson de Jesus Segantine^{1,*}, Fábio de Assis Ressel Pereira¹, Jerônimo Moura Junior²

¹Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES campus São Mateus, Rodovia BR 101 Norte, km 60, Litorâneo, CEP 29.932-540, São Mateus, ES, Brasil

²Steam Drilling do Brasil SA

*Autor para correspondência

Endereço eletrônico: edsonjsegantine@yahoo.com.br (Segantine, E. J.)

O controle da produção de areia em poços de petróleo e gás tem sido um assunto de grande interesse da indústria do petróleo. A produção de sólidos (areia) tem relação direta com o aumento dos custos de produção e tem sido amplamente relatada na literatura. Destacam-se o desgaste prematuro de equipamentos, redução ou interrupção do fluxo devido a acúmulos e o aumento considerável no número de operações de intervenção. Dentre as opções disponíveis para lidar com a produção de areia, o separador tubo-ciclônico instalado no fundo do poço de poços petrolíferos visa minimizar danos causados à coluna de produção, bombas e demais equipamentos percorrido pela mistura (fluidos e sólidos), sem contudo, causar significativa perda de carga como ocorre em telas, slotted liners e gravel pack. Seu princípio de funcionamento é baseado na geração de um campo centrífugo devido à velocidade tangencial da mistura formada por condições impostas pela geometria do equipamento, com consequente separação das fases por diferença de densidade. Os sólidos separados acumulam-se em tubos instalados na parte inferior do separador, necessitando, portanto de intervenções para limpeza. A dinâmica de fluidos associada a este tipo de separador foi investigada através da fluidodinâmica computacional. A análise iniciou com a representação geométrica tridimensional do espaço percorrido pelos fluidos, onde os detalhes do separador foram considerados, tal geometria foi utilizada para gerar malhas não estruturadas, optou-se por este tipo de malha devido a complexidade da geometria. Para as simulações foram consideradas algumas simplificações, tais como, escoamento monofásico e fluido Newtoniano. Outros modelos e parâmetros para as simulações seguiram o exposto na literatura, tais como escoamento em regime permanente, modelo de turbulência $k-\epsilon$ realizável, o algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) para o acoplamento velocidade-pressão e second-order upwind para a interpolação dos termos de convecção. Acrescenta-se ainda a consideração de fluxo isotérmico, devido às condições de operação do separador. Para as propriedades do fluido e condições de contorno, considerou-se massa específica fixa, devido a menor influência no processo de separação de partículas, vazão de entrada e viscosidade variáveis. Os resultados numéricos para velocidade tangencial e axial, são apresentados, em especial, as relações entre vazão, viscosidade e velocidade tangencial mostraram concordância com os resultados apresentados na literatura, através da análise do comprimento de decaimento. Pode-se observar também que detalhes geométricos como arredondamentos, chanfros e encaixes; apresentaram baixo gradiente de velocidades, podendo ser simplificados a fim de melhorar o processo de geração de malhas.

Palavras-chave: Separador tubo-ciclônico. CFD.

1. Introdução

A exploração de uma jazida petrolífera é um processo que envolve várias etapas e diversos profissionais. Após a etapa de prospecção, que indicará a localização da possível jazida, seguem as etapas de: perfuração, comunicação entre o reservatório e a superfície, avaliação das rochas perfuradas, estimativa da potencialidade econômica e finalmente a completção do poço. Uma vez em produção, tais poços produzem as fases fluidas (óleo, gás e água) e, em menor ou maior quantidade, a fase sólida (areia).

A separação das fases óleo, gás e água pode ser feita através de separadores bifásicos e/ou trifásicos dispostos em superfície. A fase sólida, por sua vez, deve ser separada ou minimizada, a fim de reduzir intervenções e paralisações de produção. Dentre as alternativas para a minimização da produção

de areia, destaca-se neste trabalho a utilização de separadores tipo tubo-ciclônico instalado no fundo do poço, cujo objetivo é remover a maior quantidade possível da fase sólida antes da admissão na bomba e na coluna de produção.

Com o intuito de investigar de forma mais detalhada a dinâmica de fluidos associados a este tipo de equipamento, lançou-se mão de técnicas numéricas da fluidodinâmica computacional, as quais permitem a modelagem do escoamento através de suas equações governantes e propriedades associadas, permitindo lidar com diversas condições e analisar características do fluxo indisponíveis experimentalmente.

2. Revisão bibliográfica

Do ponto de vista geológico, rochas antigas são geralmente mais consolidadas que rochas jovens devido ao maior tempo para a diagênese. No entanto, se protegidas de compactação e/ou cimentação, rochas antigas podem ainda ser relativamente fracas, uma vez que a consolidação está diretamente relacionada à cimentação entre os grãos. Em contrapartida, os mecanismos que mantêm os grãos juntos também limitarão as gargantas dos poros reduzindo a permeabilidade e a porosidade. Desta forma, arenitos de alta porosidade e permeabilidade, e conseqüentemente alto potencial para a produção de petróleo, são mais susceptíveis à produção de areia. Tais arenitos são considerados inconsolidados e podem ser classificados como:

- friável: é comum a produção de areia no início de sua vida produtiva, decrescendo até chegar a traços;
- parcialmente consolidados: produz quantidades de areia acima do aceitável;
- totalmente inconsolidado (*quicksand*): a produção de areia ocorre em altas concentrações e de forma constante.

De acordo com Bellarby (2009) a produção de areia é sensível a fatores tais como o *drawdown* e ao fluxo de água no meio poroso, este último provoca redução das forças capilares, aumento do arrasto de partículas de areia, mudança de permeabilidade relativa e enfraquecimento do cimento.

Vários problemas devido a produção de areia em poços de petróleo têm sido citados na literatura. De acordo com Simões *et al.* (2003) alguns dos principais problemas são a deposição no interior do poço, encobrimento dos canhoneados, formação de *bridge* na coluna de produção, causando a redução ou interrupção do fluxo, erosão de equipamentos de superfície e de sub-superfície, e acúmulo de areia nos equipamentos de superfície. Uma consequência direta é o aumento dos custos de produção pela necessidade de intervenções. Os principais desafios apresentados são o atendimento imediato, podendo gerar atrasos no cronograma de produção da reserva, a indisponibilidade de sondas terrestres e o elevado custo operacional (MAIA *et al.* 2001).

2.1 Separadores ciclônicos

Estão disponíveis diversos equipamentos para lidar com a produção de areia em poços de petróleo, em especial, o foco deste trabalho são separadores que utilizam o princípio de força centrífuga. O princípio de funcionamento é baseado na geração de um campo centrífugo através da velocidade tangencial das fases (fluidos e sólidos) formado por condições impostas pela geometria do equipamento ao movimento das fases presentes (HOFFMANN e STEIN, 2008). A separação das fases ocorre por diferença de densidade.

A Fig. 1 mostra um separador tubo-ciclônico, bem como a posição de sua instalação, mostra ainda o caminho percorrido pelos fluidos e sólidos. As fases entram no equipamento por seis seções na parte superior do tubo externo, sendo então direcionadas em espiral (hélice) gerando um campo centrífugo e separando sólido de fluidos. Os separadores tubo-ciclônicos podem apresentar um ou mais canais helicoidais formados por hélices fixas. Estes canais causam uma restrição ao fluxo aumentando a velocidade das fases, as quais são descarregadas na chicana na forma de um jato, tangencial à parede do tubo externo. Observe que os sólidos, uma vez separados, acumulam-se no reservatório de sólidos, necessitando, portanto, de intervenções para sua limpeza.

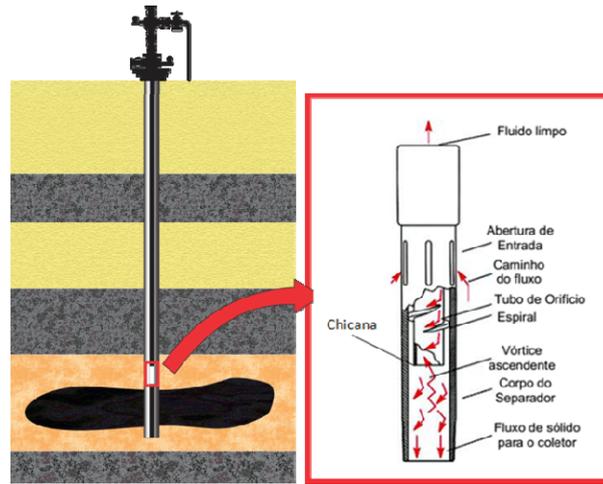


Figura 1: Desenho esquemático do separador tubo-ciclônico e da localização de sua instalação.

Um importante deste tipo separador foi desenvolvido por Martins (2006), o qual desenvolveu estudos experimentais e numéricos no separador Cavins[®] contendo duas hélices. Observou-se um aumento da eficiência de separação de sólidos em função do aumento de vazão de entrada, aumento do diâmetro de partícula e diminuição da viscosidade, sendo pouco sensível a variações na densidade do líquido. Neste considera-se ainda a utilização de um comprimento de decaimento, representado pela distância entre a chicana e o ponto a partir do qual tem-se velocidade tangencial igual à zero.

2.2 Equações básicas para a simulação

Neste estudo foram considerados escoamento isotérmico, permanente, turbulento e laminar, monofásico e com fluido Newtoniano. As principais equações utilizadas na resolução do problema são o princípio de conservação da massa, Eq. (1), e da conservação do movimento, Eq. (2).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

sendo ρ a massa específica do fluido, S_m o termo fonte, que representa a massa adicionada à fase contínua de uma segunda fase dispersada, \vec{v} o vetor velocidade do fluido e $\nabla \cdot$ o operador divergente.

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

sendo p é a pressão estática, $\bar{\tau}$ é o tensor de tensões, e $\rho \vec{g}$ e \vec{F} são a força de corpo gravitacional e as forças de corpo externas, respectivamente.

Devido à escassa literatura que trata do separador tubo-ciclônico instalados no fundo do poço, foram analisadas simulações numéricas em outros modelos de separadores que utilizam o princípio de força centrífuga na separação de fases. Os resultados numéricos mostraram boa concordância com resultados experimentais para o modelo de turbulência k - ε realizável, como abordado por Hreiz, Gentric e Midoux (2011) no estudo do escoamento em ciclones cilíndricos com padrão de fluxo assimétrico, sendo indicado para escoamentos com forte curvatura das linhas de corrente, vórtices e rotação (FLUENT, 2013). As equações de transporte para k e ε para este modelo são apresentadas a seguir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \quad (4)$$

o termo G_k representa a geração de energia cinética turbulenta devido ao gradiente de velocidade média, G_b é a geração de energia cinética turbulenta devido aos efeitos de empuxo, sendo $C_{3\varepsilon}$ o grau para o qual ε é afetado por este. O último termo das Eqs. 3 e 4 correspondem à taxa de destruição de k ou ε ,

respectivamente, C_2 e $C_{1\varepsilon}$ são constantes, σ_k e σ_ε são os números de turbulência de Prandtl para k e ε , respectivamente, cujos valores são $C_2 = 1,9$, $C_{1\varepsilon} = 1,44$, $\sigma_k = 1,0$ e $\sigma_\varepsilon = 1,2$ (FLUENT, 2013).

2.3 Fluidodinâmica computacional

A resolução de problemas através da fluidodinâmica computacional segue três passos: pré-processamento, resolução do problema através do solver e pós-processamento. O pré-processamento consiste na entrada de dados do problema de fluxo no programa através da definição da geometria ou domínio, geração da malha, ou seja, discretização do domínio em pequenos sub-domínios ou elementos, seleção do fenômeno físico ou químico a ser modelado, definição das propriedades físicas e especificação das condições de contorno.

As equações descritas anteriormente são resolvidas numericamente considerando a técnica dos volumes finitos implementada no Ansys Fluent[®] 14.0, solver utilizado neste trabalho. Tais algoritmos são construídos através dos seguintes passos: integração das equações que governam o fluxo de fluido sobre todos os elementos da malha; discretização-conversão das equações integrais resultantes em um sistema de equações algébricas; linearização e solução iterativa das equações discretizadas.

Dentre os algoritmos utilizados no acoplamento velocidade-pressão, destaca-se o SIMPLE (*Semi-Implici tMethod for Pressure-Linked Equations*) utilizado por Hreiz, Gentric e Midoux (2011). Para a interpolação dos termos de convecção o esquema *second-order upwind* foi utilizado de forma satisfatória por diversos autores da literatura investigada, tais como Hoffman e Stein (2008) e Hreiz, Gentric e Midoux (2011).

3. Metodologia

A simulação numérica seguiu as etapas de pré-processamento, resolução do problema pelo solver e pós-processamento, como descrito abaixo.

Na primeira etapa do pré-processamento foi definido a geometria ou volume de controle para a simulação, correspondendo ao espaço percorrido pelo fluido durante o escoamento no separador tubociclônico, incluindo o tubo externo. A fim de garantir uma representação detalhada do separador, buscou-se representar seus detalhes durante a construção da geometria. Foram realizadas medidas *in loco* do separador utilizando um paquímetro Starrett tipo universal digital série 799 com precisão de 0,05 mm. Para a construção da hélice, a mesma foi molhada com fluido lubrificante e sua impressão gravada. Por fim, o comprimento da região externa ao separador corresponde ao comprimento do tubo externo, sem adição de outros tubos como ocorre em aplicações reais, uma vez que a extensão do comprimento do tubo externo aumentaria substancialmente o número de elemento da malha, exigindo estrutura de *hardware* indisponível. As medidas obtidas e a impressão da hélice foram importadas para o software Autodesk Inventor Professional[®] 2013. A Fig. 2 mostra a geometria em quatro diferentes posições rotacionadas axialmente em 90°. A Fig. 3 apresenta uma comparação entre as hélices da geometria construída e do separador, respectivamente. Observe que a geometria da Fig. 3 foi espelhada.

Após a construção, a geometria foi exportada para o software Ansys Icem CFD[®] 14.0 a fim de definir os contornos e gerar as malhas computacionais. A Fig. 4 mostra os contornos da geometria, sugestivamente nomeados de ENTRADAS, PAREDE e SAIDA. Devido à complexidade da geometria, optou-se por trabalhar com malhas não estruturadas construídas através do método *Octree*. A fim de obter independência dos resultados em relação a malha, realizou-se um teste de malhas com elementos variando entre 641.298 e 4.324.133, investigando a velocidade tangencial em uma determinada posição do separador. Tomou-se como base a concordância dos resultados e o tempo de simulação a partir do qual selecionou-se uma malha com 3.309.721 elementos.

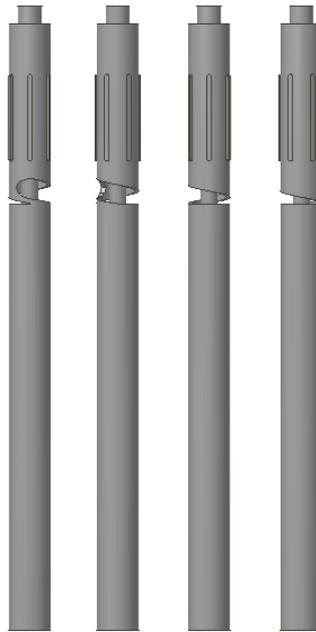


Figura 2: Visão geral da geometria em quatro posições rotacionadas axialmente em 90°.



Figura 3: Detalhe da hélice na geometria construída e no separador tubo-ciclônico.

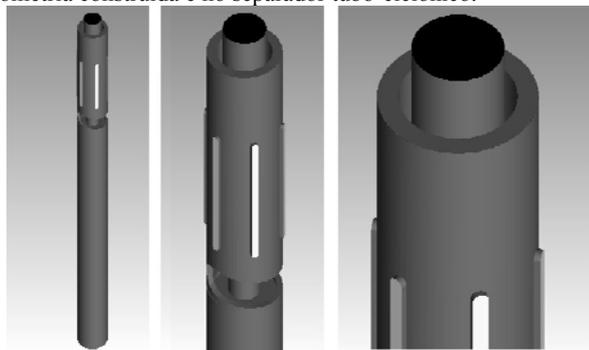


Figura 4: Contornos da geometria: ENTRADAS (branco); PAREDE (cinza); e SAIDA (preto).

Após a construção da malha e definição dos contornos, a mesma foi exportada para o software Ansys Fluent® onde foram concluídos o pré-processamento e gerado as simulações, considerou-se as equações básicas para o escoamento permanente, incompressível, isotérmico, turbulento e monofásico com fluido Newtoniano, a saber, princípio de conservação da massa, princípio de conservação da quantidade do movimento e o modelo de turbulência k-ε realizável já implementados no solver. Selecionou-se ainda o algoritmo SIMPLE para o acoplamento velocidade-pressão e *second-order upwind* para a interpolação dos termos de convecção. Outras equações para o cálculo do número de Reynolds e diâmetro hidráulico foram utilizadas a fim de obter o regime de escoamento em diversas regiões do separador. Por fim, os resultados das simulações foram exportados para o software Ansys CFD-Post® para visualização, a partir do qual pode-se analisar a velocidade total, tangencial e axial, por meio de linhas de corrente e perfis, bem como a influencia da vazão e viscosidade na velocidade total por meio de linhas de corrente. Por fim, desenvolve-se uma análise com base no comprimento de decaimento, definido

como a distância entre a chicana em o ponto a partir do qual a velocidade tangencial é nula. Maiores informações estão detalhadamente apresentadas em Segantine (2014).

4. Resultados

Foram selecionadas a vazão de entrada (Q_{in}) e a viscosidade (μ) do fluido como condição de contorno e propriedade a serem investigadas, de acordo com a [Tabela 1](#). Uma vez que a eficiência de separação é pouco dependente da massa específica do fluido (MARTINS, 2006) esta foi tomada como constante e igual a 850 kg/m^3 .

O número de Reynolds depende significativamente da posição na geometria, assim, considerou-se o regime de escoamento como turbulento se ao menos uma região apresentasse tal regime. O número de Reynolds para as simulações é apresentado na [Tabela 1](#). Uma vez que softwares comerciais geralmente ignoram o regime de transitório e classificam o fluxo como laminar ou turbulento (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007), adotou-se o valor de $Re = 2.000$ como transição entre os regime laminar e turbulento (FOX e MCDONALDS, 2001).

Tabela 1: Variações da vazão de entrada e viscosidade para as simulações.

Simulação	1	2	3	4	5	6
Q_{in} (m^3/dia)	5	10	20	30	40	50
μ (cP)	10	10	10	10	10	10
Re	714	1428	2856	4284	5711	7139
Simulação	6	7	8	9	10	11
Q_{in} (m^3/dia)	50	50	50	50	50	50
μ (cP)	10	25	50	75	100	150
Re	7139	2856	1428	952	712	475

4.1 Análise do campo de velocidades

O campo de velocidades é composto pelas componentes axial, tangencial e radial, em especial, destaca-se o papel da velocidade tangencial no processo de separação das fases. Inicialmente, selecionou-se a simulação 6, devido aos altos gradientes de velocidades, a fim de analisar a velocidade total do escoamento. A [Fig. 5](#) apresenta as linhas de corrente para o separador em quatro posições rotacionadas em 90° , a partir desta observa-se os altos gradientes de velocidade na saída da hélice. Tal velocidade varia de $0,125 \text{ m/s}$ nas entradas para um valor máximo de $19,24 \text{ m/s}$ com média de $8,47 \text{ m/s}$, sobretudo causado pela redução da área. Esta restrição ao fluxo promoveu um aumento da velocidade à jusante forçando o fluxo contra a parede do separador e axialmente para baixo num movimento helicoidal. À medida em que o fluxo avança, sua velocidade é dissipada e as linhas de corrente indicaram um movimento radial na direção contrária à parede e um movimento axial em direção ao tubo de produção. Tal assimetria no fluxo foi observado por Hreiz, Gentric e Midoux (2011).

Através da [Fig. 5 b-c](#) é possível observar uma forte inclinação nas linhas de corrente, as quais seguem, inicialmente, o ângulo formado pela hélice, observa-se também que existe uma grande perda de energia, em termos de velocidade, na região abaixo da saída da hélice. Não foram observados gradientes de velocidade significativos na parte interna do tubo de produção devido ao diâmetro de encaixe dos componentes do separador ([Fig. 6](#)). Observou-se porém um pequeno aumento da velocidade devido ao diâmetro da entrada deste mesmo tubo, como apresentado na [Fig. 6](#). Observa-se ainda que não houve influência dos detalhes geométricos, bem como arredondamentos e chanfros, no padrão de fluxo.

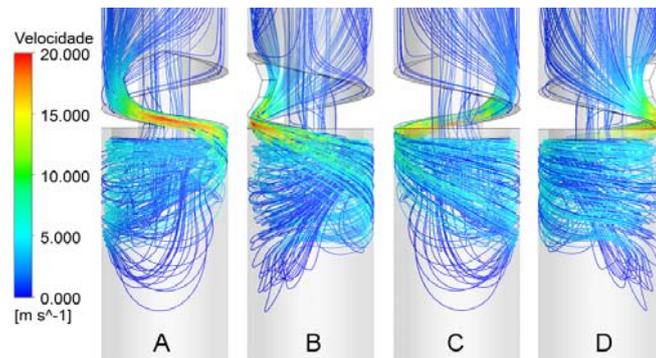


Figura 5: Linhas de corrente para a velocidade ao longo do separador rotacionadas axialmente em 90°.

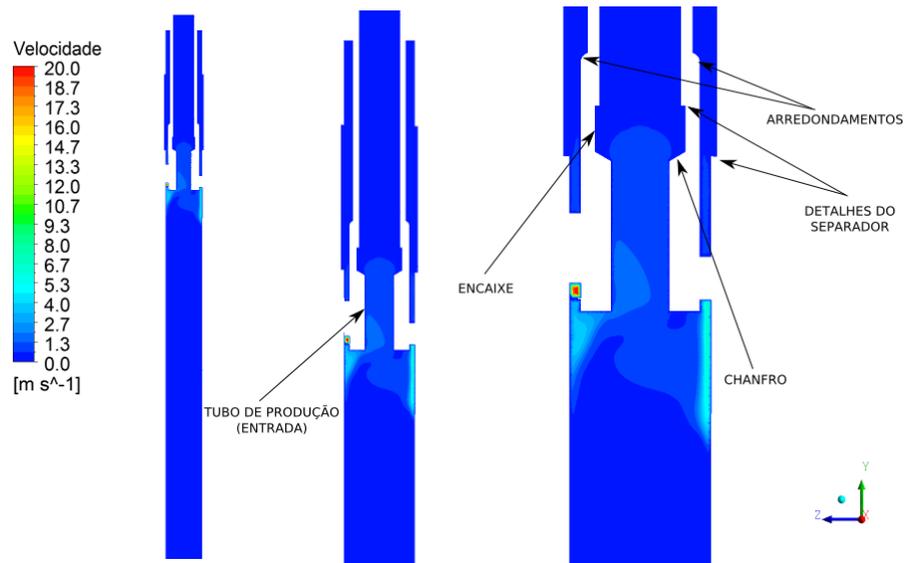


Figura 6: Contorno de velocidade num plano axial.

4.2 Velocidades Tangencial e Axial

A partir da simulação 6 pode-se avaliar as componentes tangencial e axial da velocidade com base em linhas de coleta de dados, de acordo com a Fig. 7 e apresentado na Tabela 2. Nesta configuração, as velocidades tangencial (U) e axial (V) são relativas aos eixos X e Y respectivamente, sendo a distância radial representada por Z.

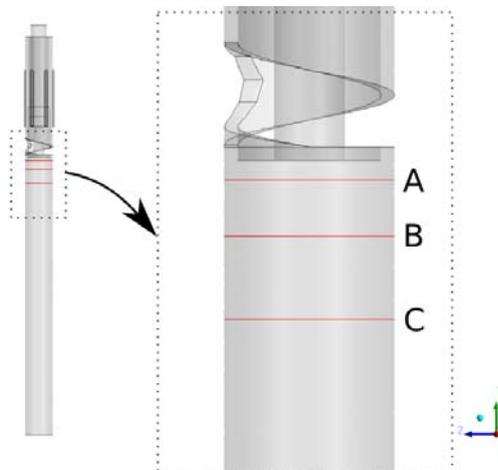
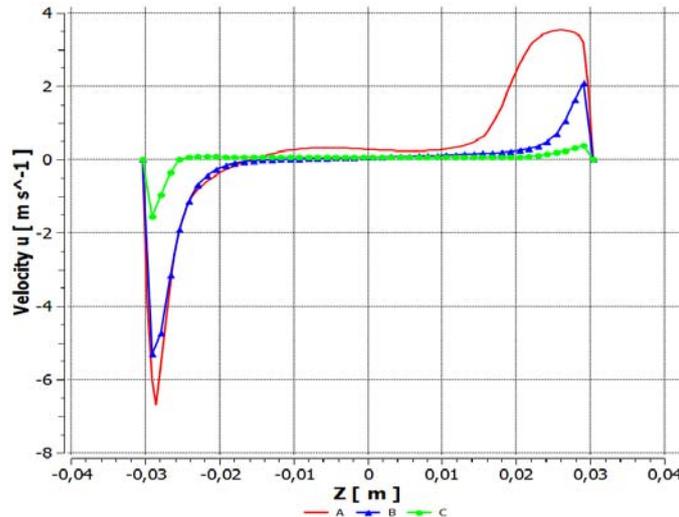


Figura 7: Posição das linhas de coleta de dados ao longo do separador.

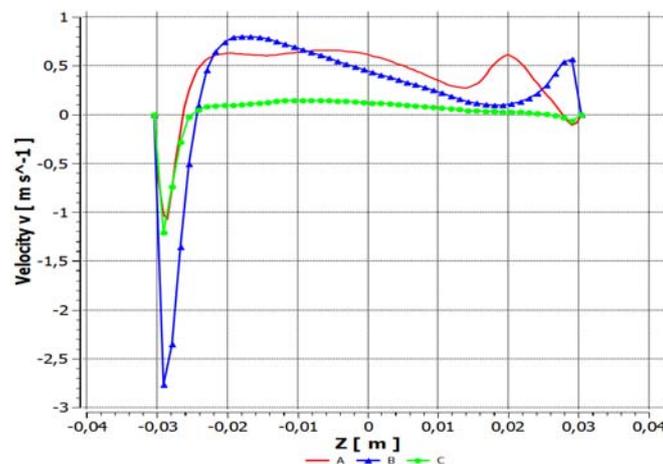
Tabela 2: Localização das linhas de análise da velocidade da velocidade tangencial em relação à chicana

Linha de coleta de dados	A	B	C
Distância em relação à chicana (mm)	7	27	57

Com base nos perfis de velocidade tangencial, ilustrados na Fig. 8, pode-se observar o caráter fortemente assimétrico, reduzindo gradualmente com a distância em relação à chicana, observa-se ainda velocidades, em módulo, inferiores a 0,2 m/s na região central, tornando-se praticamente nulas para profundidades superiores a 17 mm. Não foi observado o comportamento de fluxo de vórtices forçado e livre, como apresentado por Hoffmann e Stein (2008), possivelmente devido as simplificações na dedução de tais equações, dentre elas, as considerações de fluxo axisimétrico e ausência de gradientes axial e radial.

**Figura 8:-** Perfis de velocidade tangencial ao longo do separador.

O mesmo caráter assimétrico foi observado nos perfis de velocidade axial, ilustrados na Figura 9 para as mesmas posições da análise acima. Três comportamentos distintos podem ser observados: velocidade axial fortemente negativa agindo junto a parede do separador a jusante da saída da hélice; velocidade axial positiva de magnitude moderada agindo na região central e abaixo da saída da hélice do separador; e, por fim, velocidade axial negativa de baixa magnitude abaixo da saída da hélice para as profundidades de 7 e 57 mm. A análise conjunta das Figs. 5 e 9 revelam que apenas uma pequena região no separador é responsável pelas velocidades axiais negativas, sendo estas devido ao comportamento inclinado do fluxo, que por sua vez, resultam da inclinação da saída da hélice.

**Figura 9:** Perfis de velocidade axial ao longo do separador.

4.3 Efeito da vazão e viscosidade na velocidade tangencial

As linhas de fluxo para as simulações 1, 2, 3, 4, 5 e 6 estão apresentadas na Fig. 10 da esquerda para a direita, respectivamente. A partir desta é possível inferir a relação direta entre a vazão de entrada e a velocidade na saída da hélice, o aumento da vazão promoveu também maior distribuição e permanência das linhas de corrente na parede do separador, bem como maior profundidade de alcance para o fluxo descendente de maior energia. Em relação às profundidades de alcance das linhas de corrente, observa-se uma pequena redução da simulação 5 para 6.

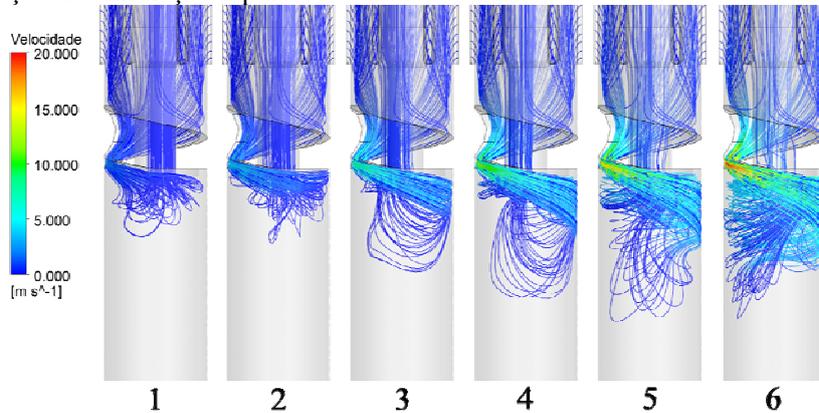


Figura 10:- Linhas de corrente para a velocidade ao longo do separador.

As linhas de fluxo para as simulações 6, 7, 8, 9, 10 e 11 estão apresentadas na Fig. 11 da esquerda para a direita, respectivamente. O aumento da viscosidade promoveu uma menor distribuição e permanência das linhas de corrente na parede do separador, bem como menor profundidade de alcance para o fluxo descendente de maior energia, mesmo que de forma menos pronunciada.

Os resultados da literatura indicam um aumento na eficiência de separação de sólidos com o aumento da vazão e uma redução na eficiência de separação de sólidos com o aumento da viscosidade, em ambos os casos num comportamento não linear apresentando uma redução da taxa de crescimento da eficiência à medida que incrementa a vazão ou a viscosidade.

De acordo com Martins (2006) a velocidade tangencial é decisiva na separação de sólidos. Desta forma, com o intuito de contribuir para tais observações, propôs-se avaliar os efeitos da vazão e da viscosidade na componente tangencial da velocidade através da vazão de entrada no comprimento de decaimento (L), definido por este mesmo autor. Para a análise, foi construído um plano perpendicular ao eixo axial com posição variável em relação a este eixo, a fim de obter a distância (L) entre a chicana e a posição cujo valor máximo em módulo da velocidade tangencial seja inferior a 0,001 m/s, escolhido arbitrariamente.

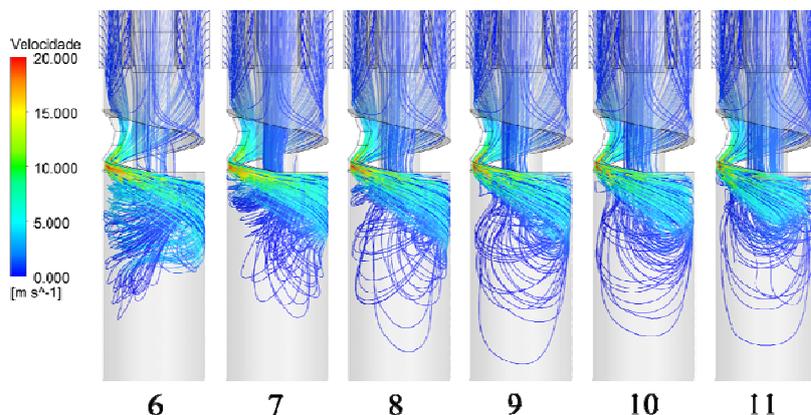


Figura 11: Linhas de corrente para a velocidade ao longo do separador.

O comportamento do gráfico da Fig. 12 indica uma relação direta entre as entre a vazão e o comprimento de decaimento, porém, observa-se uma redução na taxa de crescimento com o aumento da vazão.

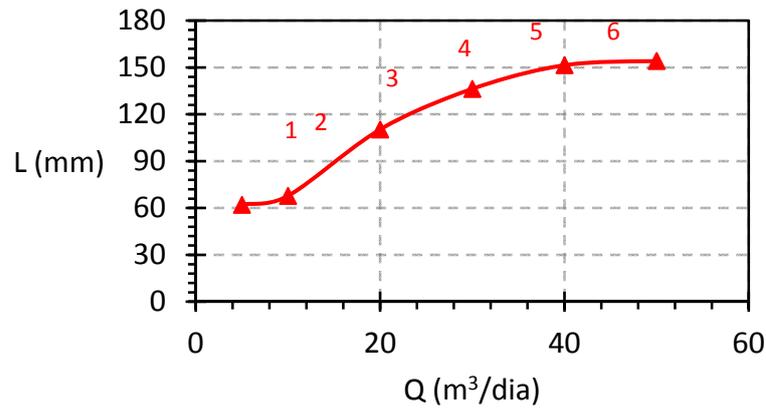


Figura 12: Relação entre a vazão de entrada e o comprimento de decaimento (L).

A análise acima indica a existência de condições ótimas para a relação vazão-velocidade tangencial. Como não foi possível obter resultados para vazões superiores a $50 \text{ m}^3/\text{dia}$, para os casos testados, não pode-se inferir tendências para este comportamento. Mas qualitativamente sugere-se a tendência de que o comprimento de decaimento de 150 mm seria o menor valor para vazões superiores a $50 \text{ m}^3/\text{dia}$.

O comportamento do gráfico da [Fig. 13](#) indica uma relação inversa para as variáveis viscosidade e comprimento de decaimento a partir da simulação 7, pode-se observar ainda uma aumento acentuado na taxa de decrescimento com o aumento da viscosidade.

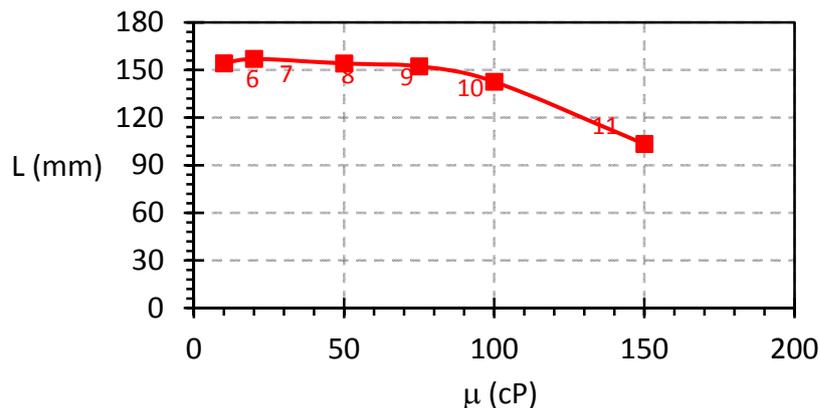


Figura 13 - Relação entre a viscosidade e o comprimento de decaimento (L).

5. Conclusões e recomendações

Foram realizadas simulações numéricas monofásicas num separador tubo-ciclônico com uma única hélice, o mesmo sendo utilizado na separação de sólidos e instalado no fundo do poço. A construção da geometria levou em consideração diversos aspectos do separador, bem como detalhes como arredondamentos, chanfros, encaixes imperfeitos de rosca e características assimétricas da hélice, limitando porém o tubo externo ao comprimento padrão do mesmo. Tais detalhes aumentaram a complexidade da geometria, limitando à utilização de malhas não-estruturadas.

Os resultados numéricos para as velocidades tangencial e axial revelam um padrão de escoamento assimétrico, sobretudo, devido a assimetria na geometria do separador. As relações entre vazão, viscosidade e velocidade tangencial mostraram concordância com os resultados apresentados na literatura, através da análise do comprimento de decaimento. Observou-se que o aumento da vazão vem acompanhado do aumento significativo do comprimento de decaimento, exceto para valores superiores a $40 \text{ m}^3/\text{dia}$, e variações da viscosidade inferiores a 75 cP resultam numa variação inferior a 2% no comprimento de decaimento. Recomenda-se, porém, simulações com injeção de partículas a fim de investigar a eficiência do separador.

Uma vez que os detalhes geométricos supracitados estavam fora da região de maior gradiente de velocidades, recomenda-se a simplificação destes a fim de melhorar o processo de geração de malhas.

Referências bibliográficas

BELLARBY, J. Well Completion Design, Elsevier, 2009.

FLUENT 14.0, TheoryGuide, 2013.

FOX, R. W., McDonald, A. T. - Introdução à mecânica dos fluidos. 5.ed. Rio de Janeiro. LTC, 2001.

HOFFMANN A.C.; STEIN L.E., Gas Cyclones and Swirl Tubes: Principles, Design and Operation, Second Edition, Springer, 2008.

HREIZ, R.; GENTRIC, C.; MIDOUX, N. – Numérical Investigation of Swirling Flow In Cylindrical Cyclones – Chemical Engineerinf Research and Design, 2011.

MAIA, Rosiery da Silva. *et al.* Otimização das intervenções em poços de petróleo por sondas de produção terrestre: Busca Tabu, 34º Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO), Rio de Janeiro, 2001.

MARTINS, Jason Alves, Separador Sólido-Líquido para Operação em Fundo de Poços de Petróleo, Unicamp, Campinas-SP, 2006.

SEGANTINE, E. J, Estudo do escoamento em um separador tubo-ciclônico através da fluidodinâmica computacional, Projeto de Graduação, Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus-ES, 2014.

SIMÕES, S.Q. *et al.* Pré-separação de areia em plataformas de produção: Resultados preliminares, 2º congresso brasileiro de P&D em petróleo e gás, 2003.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W., An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, 2ª edição, Pearson Education Limited, 2007.