

TRANSPORTE DE ÓLEOS PESADOS VIA TÉCNICA CORE-FLOW EM DUTOS CURVADOS: ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E DA PERDA DE CARGA

Sidclei Benevides da Conceição¹; Kelly Cristinne Leite Angelim²; Antonio Gilson Barbosa de Lima³

¹ Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia de Mecânica – sidcleibenevides@yahoo.com.br

² Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica – kellyangelim01@gmail.com

³ Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica – antonio.gilson@dem.ufcg.edu.br

RESUMO

O escoamento multifásico de óleo, gás e água ocorre na indústria do petróleo desde o reservatório até as unidades de processamento. A ocorrência de óleos pesados e ultrapesados no mundo vêm aumentando sensivelmente e aponta para a necessidade de maiores investimentos na exploração dos reservatórios e, conseqüentemente, para o desenvolvimento de novas tecnologias para produção e transporte deste tipo de óleo. Deste modo, torna-se interessante aprimorar técnicas que garantam o aumento da eficiência energética do transporte de petróleo tendo em vista a carência de estudos que abordam escoamento trifásico via técnica core-flow em dutos curvados, principalmente em situações onde existe transferência de calor. O objetivo deste trabalho é estudar numericamente o escoamento isotérmico de óleos pesados e ultraviscosos, água e gás em dutos curvados, empregando a técnica core-flow. Resultados associados a eficiência do transporte bem como a eficiência energética do processo são apresentadas e analisadas. Verificou-se que a presença do filme de água reduz significativamente a perda de carga do escoamento de petróleo pesado, e a necessidade de se encontrar um intervalo de operação otimizado em que se obtenha além dos ganhos com o perda de carga redução no consumo de energia.

Palavras-chave: Óleo Pesado, Core-flow, Eficiência Energética, Simulação CFX.

1. INTRODUÇÃO

O escoamento multifásico de óleo, gás e água ocorre na indústria do petróleo desde o reservatório até as unidades de processamento. O cenário brasileiro revela que as reservas de petróleo leve são escassas, restando para o futuro a produção de hidrocarbonetos pesados. Deste modo, buscam-se tecnologias que venham minimizar possíveis problemas decorrentes da produção de óleo pesado. No que diz respeito ao transporte, pode-se afirmar que as altas

viscosidade e densidade, e a elevada queda de pressão por fricção que ocorre durante o escoamento são situações comuns ao se produzir este tipo de hidrocarboneto. Estas condições exigem uma carga de trabalho excessiva dos equipamentos, e conseqüentemente uma grande demanda de energia, a ponto de tornar a produção destes óleos economicamente inviável. O conceito de eficiência energética relaciona a quantidade de energia consumida por determinado equipamento ou aparelho com a

quantidade de energia efetivamente utilizada por ele para realizar a tarefa a que se propõe.

O Plano Nacional de Eficiência Energética [2011] considera ações de eficiência energética como aquelas que compreendem modificações ou aperfeiçoamentos tecnológicos ao longo da cadeia, mas podem também resultar de uma melhor organização, conservação e gestão energética por parte das entidades que a compõem. Neste sentido uma solução para minimizar tais dificuldades energéticas associadas com o transporte de óleos pesados é a utilização da técnica *core-flow*.

Segundo Trevesian [2003] Esta técnica consiste na injeção de água nas laterais da tubulação, em vazões inferiores a do óleo, com o objetivo de se obter um padrão de escoamento anular, onde a água escoar como uma fase contínua formando uma película que envolve o óleo, evitando o contato deste com as paredes do duto e, conseqüentemente reduzindo a queda de pressão por atrito. Estudar alternativas que garantam não somente a eficiência do transporte mas também a eficiência energética, atualmente, é um dos grandes desafios da indústria do petróleo.

Diante do exposto este trabalho tem por objetivo estudar numericamente o escoamento trifásico, isotérmico, transiente e tridimensional de óleo pesado-água-gás,

buscando encontrar um intervalo de operação em que se obtenha a garantia da redução da perda de carga associada a uma redução do consumo de energia.

2. METODOLOGIA

O estudo foi desenvolvido no Laboratório Computacional de Térmica e Flúidos (LCTF), da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UEAM) do Centro de Ciências e Tecnologia (CCT) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). O computador utilizado para criação da malha e desenvolvimento da geometria foi um PC Intel Quad Core 3.2 GHz, 8Gb Ram e HD de 1 Terabyte.

A malha foi criada no módulo ANSYS ICEM CFD®. Os domínios de estudo foram criados por meio da definição de pontos, curvas, superfícies e sólidos descrevendo o seu tamanho e o seu formato. O duto utilizado para simulações possui comprimento reto de 3m antes da curvatura ao longo do eixo z, e 3 metros retos após a curvatura ao longo do eixo y, totalizando 6m de trechos retos (Figura 1 e 2).



II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

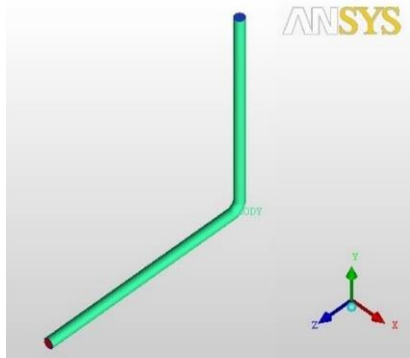


Figura 1: Geometria do problema

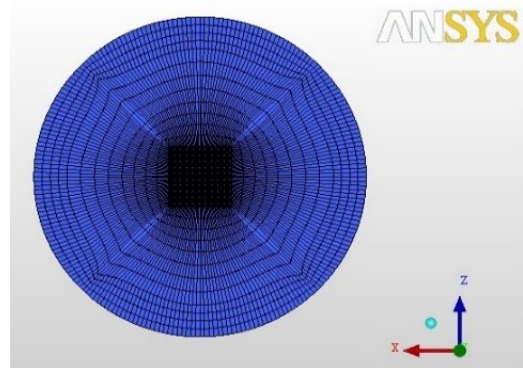


Figura 4: Detalhes da região de saída

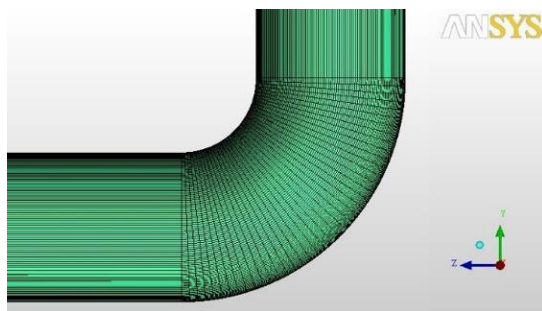


Figura 2: Malha estruturada com foco na curvatura.

A curvatura possui um raio de 20 cm e o diâmetro da tubulação é de 15 cm. A malha estruturada possui 279552 elementos hexaédricos.

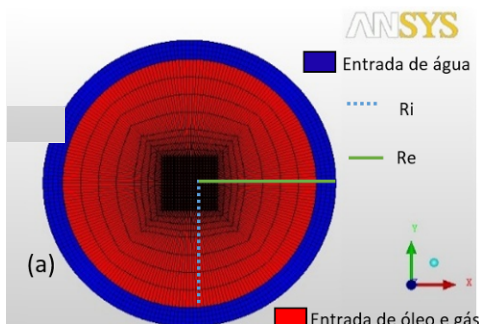


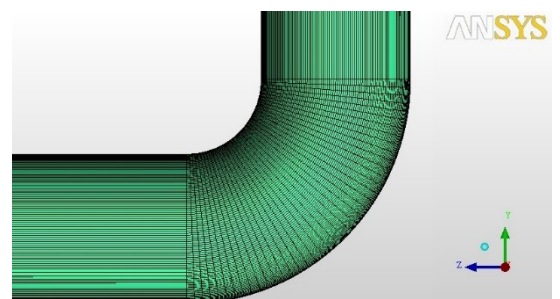
Figura 3: Detalhes da região de entrada Ri = 65 cm; Re = 75 cm

2.1 Modelagem Matemática Multifásica

As condições matemáticas adotadas são referentes a um estudo Euleriano-Euleriano com abordagem não homogênea. Tais considerações possibilitam um estudo em que cada fase possui seu campo de escoamento, havendo assim, um conjunto de soluções para cada fase separadamente. As fases presentes no escoamento são representadas pelas letras α , β , e γ . As condições gerais do escoamento trifásico (água-óleo-gás) foram: escoamento isotérmico, transiente, tridimensional, sem transferência de massa, incompressível, propriedades termo-físicas constantes e presença de força de corpo. Para modelar o escoamento multifásico em três dimensões, utilizou-se das seguintes equações:

- Equação da Continuidade:

$$\frac{\partial}{\partial t} (f_{\alpha} \rho_{\alpha}) + \nabla \cdot (f_{\alpha} \rho_{\alpha} \vec{U}_{\alpha}) = 0 \quad [1]$$





- Equação da Quantidade de Movimento

$$\frac{\partial}{\partial t} (f_{\alpha} \rho_{\alpha} \vec{U}_{\alpha}) + \nabla \cdot [f_{\alpha} (\rho_{\alpha} \otimes \vec{U}_{\alpha})] = -f_{\alpha} \nabla P_{\alpha} + \nabla \cdot \{f_{\alpha} \mu_{\alpha} [\nabla \vec{U}_{\alpha} + (\nabla \vec{U}_{\alpha})^T]\} + \vec{M}_{\alpha} \quad [2]$$

onde assume-se que para a fase α , f é a fração volumétrica, ρ é a densidade, \vec{U} é o vetor velocidade, μ é a viscosidade dinâmica, p é a pressão, M_{α} descreve as forças interfaciais (força de arraste, força lift, força de massa virtual, força de lubrificação na parede e força de dispersão turbulenta na interface), forças essas que atuam em α devido a presença de outras fases.

Para o escoamento do tipo core-flow, a água escoar em regime turbulento, deste modo, foi escolhido o modelo k- ϵ para calcular tais efeitos. As equações da energia cinética turbulenta e da dissipação viscosa turbulenta, respectivamente são:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{kRNG}} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \epsilon \quad [3]$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \epsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\epsilon RNG}} \right) \nabla \epsilon \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{\epsilon 1 RNG} P_k - C_{\epsilon 2 RNG} \rho \epsilon) \quad [4]$$

onde P_k é a produção de turbulência devido às forças relativa a viscosidade e das forças de flutuação e μ_t é a viscosidade turbulenta, dada pela Equação 5, como segue:

$$\mu_t = C_{\mu} \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad [5]$$

Sendo: $C_{\mu} = \sigma_{kRNG} = 0,7179$,

$\sigma_{\epsilon RNG} = 0,7179$ e $C_{\epsilon 2RNG} = 1,68$.

2.2 Condições Iniciais e de Contorno

- **Escoamento Predominante de Óleo e Gás**

Foram simulados alguns casos com o interesse de analisar o escoamento trifásico de óleo e gás com a presença bem reduzida da água. As premissas referentes a entrada da água levaram em consideração uma fração volumétrica de água não-nula, entretanto em condições reduzidas e a baixas velocidades, como segue:

$$0 < r < (R - Vr) \Rightarrow \begin{cases} u_a = 0,001 \text{ m/s} \\ u_f = 0,01 \\ u_o = u_g = 1,06 \text{ m/s} \\ f_o = 0,98 \\ f_g = 0,01 \end{cases}$$

onde adota-se R como o raio da tubulação e r o raio do núcleo de óleo e gás para todos os casos.

As considerações acerca da entrada de óleo e gás foram baseadas nas seguintes condições:



$$(R - Vr) < r < R \Rightarrow \begin{cases} f_a = f_a = 0 \\ u_o = u_g = 1,06 \text{ m/s} \\ f_o = 0,95 \\ f_g = 0,05 \end{cases}$$

Para a região de saída foi adotado um valor de pressão relativa de 101325 Pa, com o objetivo de gerar um diferencial de pressão capaz de garantir o fluxo dos fluidos. Na parede, a condição de não deslizamento foi adotada (no-slip); nesta condição admite-se que a velocidade do fluido seja reduzida próxima às paredes do duto. Nas condições iniciais das simulações adotou-se um duto cheio de água escoando com uma velocidade de 0,5 m/s. A rugosidade adotada foi de $4,5 \times 10^{-5}$ m e a temperatura de 25 °C.

- **Escoamento Predominante de água**

Também buscou-se analisar o escoamento predominante de água, adotando-se condições que permitiam considerar o estudo semelhante a um escoamento monofásico de água. As premissas referentes a entrada da água são as seguintes:

$$0 < r < (R - Vr) \Rightarrow \begin{cases} u_a = 0,5 \text{ m/s} \\ f_a = 1 \\ u_o = u_g = 0 \\ f_o = f_g = 0 \end{cases}$$

onde adota-se R como o raio da tubulação e r o raio do núcleo de óleo e gás para todos os casos.

As considerações acerca da entrada de óleo e gás foram baseadas nas seguintes condições:

$$(R - Vr) < r < R \Rightarrow \begin{cases} f_a = 0,5 \\ f_o = 0,98 \\ u_o = u_g = 0,001 \text{ m/s} \\ f_g = f_g = 0,01 \end{cases}$$

As demais condições de contorno foram às mesmas adotadas, já descritas no tópico anterior.

- **Escoamento Multifásico - óleo pesado/água/gás**

Para analisar o escoamento multifásico de óleo, gás e água desenvolveu-se uma situação de escoamento trifásico em que as considerações iniciais partiram dos escoamentos predominante de óleo e gás, e predominante de água. Assim, para a sessão referente a entrada de água foram adotados $u_a = 2,0$ m/s, além de:

$$0 < r < (R - Vr) \Rightarrow \begin{cases} f_a = 1 \\ u_o = u_g = 0 \\ f_o = f_g = 0 \end{cases}$$

Para a sessão referente a entrada de óleo e gás adotou-se:

$$(R - Vr) < r < R \Rightarrow \begin{cases} f_a = f_a = 0 \\ u_o = u_g = 1,5 \text{ m/s} \\ f_o = 0,95 \\ f_g = 0,05 \end{cases}$$

As demais condições de contorno foram às mesmas adotadas, já descritas no tópico anterior.

Para encontrar o intervalo de ótimo de operação um grupo de casos fora rodado levando em consideração todas as premissas utilizadas no caso trifásico, entretanto, fixou-se a velocidade do óleo em 1 m/s e variou-se a velocidade da água.

- **Propriedades Físicas dos Fluidos e Procedimentos Numéricos da Solução**

Tabela 1: Propriedades termo-físicas dos fluidos presentes

Propriedades Físicas	Água	Óleo Pesado	Gás
Densidade (kg/m ³)	997	989	0,77895
Viscosidade dinâmica (Pa.s)	8,9x 10 ⁻⁴	12	1,1x 10 ⁻⁵
Calor específico (J/kg.K)	4181,7	1700, 0	1004,4
Condutividade térmica (W/m.K)	0,6069	0,1470	0,0261

Tabela 2: Tensão superficial entre as fases envolvidas

Água-óleo	0,067 (N/m)
Água-Gás	0,07257 (N/m)
Óleo-Gás	0,026 (N/m)

Em todos os casos trifásicos a água e o óleo foram considerados como fases contínuas e o gás disperso com um diâmetro

de bolha igual a 3 mm. O critério de convergência adotado (RMS) foi de 10⁻⁷ com simulações de 15s e um intervalo de tempo de 0,02s.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise da Eficiência do Transporte

3.1.1 Campo de Pressão

A fim de compreender o comportamento do campo de pressão de cada fluido ao longo do escoamento, foram rodados casos de escoamentos monofásicos de óleo e de água. Estes casos serviram para comparação com o escoamento trifásico, para então comprovar a queda de pressão existente após a formação do perfil anular devido a presença do core-flow. As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam a diferença de pressão total para os diferentes casos estudados.

Na comparação entre a simulação trifásica com a monofásica de óleo, a vazão volumétrica de óleo e gás em ambos os casos teve que se manter igual, dessa forma, evita-se a perda de óleo ou o ganho indesejado de água em volume de fluido transportado. A vazão volumétrica foi de 0,01890 m³/s para o óleo e o gás e 0,008791 m³/s para a água. Já para a comparação com o monofásico de água era importante manter a mesma velocidade da água.

Analisando individualmente cada caso, observa-se que o escoamento predominante

de óleo acontece mediante grandes pressões, obviamente, por se tratar de óleo pesado, ou seja, óleo com elevada viscosidade e com certa carga de contaminantes. Estas pressões de bombeio indicam perda de carga consideravelmente elevada, o que implica diretamente em uma alta potência de bombeamento.

Já no escoamento predominante de água observam-se pressões relativamente baixas devido às baixas taxas reológicas apresentadas por este fluido, o que nos remete ao raciocínio inverso em comparação com o transporte de óleo pesado, ou seja, baixa perda de carga.

A pressão no escoamento monofásico de óleo atinge o regime estacionário em 110000 Pa, enquanto a água atinge valores constantes em 1581 Pa. Para o caso trifásico, situação em que existe o perfil anular de escoamento, a pressão se torna constante em 13062 Pa.

Com este resultado é possível observar a expressiva diferença entre escoamento monofásico de óleo e o trifásico. Neste último, a diminuição na pressão é bastante expressiva e se aproxima dos valores obtidos no escoamento monofásico de água.

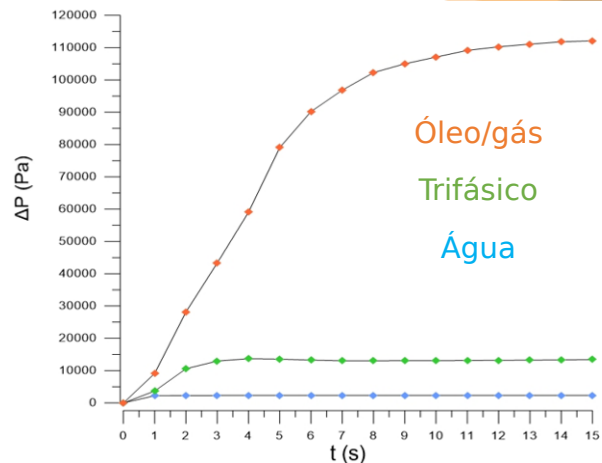


Figura 5: Variação da pressão no duto em função do tempo para três diferentes tipos de escoamento

São da pressão é facilmente visível quando se utiliza da técnica *core-flow* para escoamento de petróleo pesado, desse modo, evidencia-se uma significativa eficiência no transporte deste hidrocarboneto.

3.1.2 Eficiência Energética Associada a Perda de Carga

Além da eficiência do transporte garantida pela técnica *core-flow*, buscou-se também encontrar meios para se atingir uma eficiência energética durante o escoamento como um todo. Como já visto, o bombeamento de água e de óleo e gás são feitos em vazões diferentes e, portanto, possuem diferentes consumos energéticos.

Fora simulado um conjunto de casos onde se analisou a potência de bombeamento necessária para se escoar com diferentes vazões de água, fixando as vazões de óleo. Com esses mesmos resultados analisou-se tanto a queda de pressão associada a



utilização do *core-flow* quanto a potência de bombeamento requerida para tal escoamento.

A Tabela 3 apresenta os dados referentes ao primeiro conjunto de casos simulados. Como pode ser visto, a velocidade de escoamento do óleo e gás manteve-se constante e desse modo a vazão também. A variação da velocidade da água se deu a cada 4 m/s e o duto fora considerado liso.

De posse desses dados, foi possível calcular a potência de bombeamento da água, do óleo e assim a potência do sistema. Para cada caso estudado foi associado a redução da perda de carga com a eficiência energética para no fim, fim encontrar o intervalo em que o sistema funciona com apenas a energia necessária para garantir uma redução na perda de carga.

Tabela 3: Dados referentes ao primeiro conjunto de simulações trifásicas transientes

Caso Estudado	Velocidade da água (m/s)	Velocidade do óleo e do gás (m/s)	Ua/Uo	ΔP (Pa)
Caso 1	0,2	1	0,2	53994
Caso 2	0,6	1	0,6	21382
Caso 3	1	1	1	14648
Caso 4	1,4	1	1,4	12577
Caso 5	1,8	1	1,8	12126
Caso 6	2,2	1	2,2	11466
Caso 7	2,6	1	2,6	10398
Caso 8	3	1	3	9721
Caso 9	3,4	1	3,4	9930
Caso 10	3,8	1	3,8	10560

A medida que a velocidade e a vazão da água aumentam, menor é o diferencial de pressão associado ao escoamento.

Tabela 4 – Valores referentes ao escoamento trifásico levando em consideração a potência de bombeamento

*Intervalo de Operação

Dessa maneira, ao aumentar-se a vazão de injeção de água obtém-se uma redução significativa na perda de carga. O gráfico disposto na Figura 6 exibe este decaimento de maneira mais clara.

Caso Estudado	Vazão de água (m³/s)	Vazão de óleo e gás (m³/s)	Potência de bombeamento da água (W)	Potência de bombeamento do óleo e gás (W)	Potência de bombeamento do Sistema (W)
Caso 1	0,000879176	0,0132661	47,47	716,28	763,76
Caso 2	0,002637528	0,0132661	56,39	475,43	538,44*
Caso 3	0,004395880	0,0132661	64,39	194,32	340,05*
Caso 4	0,006154232	0,0132661	77,40	166,84	277,15*
Caso 5	0,007912584	0,0132661	87,46	164,96	258,71*
Caso 6	0,009670936	0,0132661	103,70	156,48	260,19
Caso 7	0,011429288	0,0132661	116,89	146,98	263,88
Caso 8	0,013187640	0,0132661	125,49	135,26	266,75
Caso 9	0,014945992	0,0132661	128,19	128,95	270,87
Caso 10	0,016704344	0,0132661	157,14	151,73	288,05



II CONEPETRO

II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE
PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS
IV WORKSHOP DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

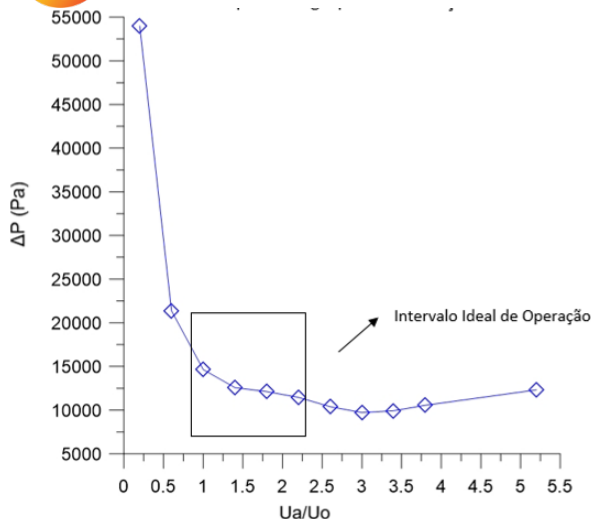


Figura 6: Queda de pressão em função do aumento da velocidade da água no duto curvado no primeiro grupo de simulações

No gráfico da Figura 6 está em destaque, o intervalo de operação em que se consegue transportar água, óleo e gás de forma eficiente e econômica. Este intervalo encontra-se entre as velocidades de injeção de água que vão de 0,6 m/s até 1,8 m/s.

A Tabela 4 apresenta os valores referentes as potências de bombeamento necessários para cada caso. Ao examinar a potência de bombeamento do sistema, percebe-se que a partir de determinada vazão de água, os ganhos em perda de carga se tornam constantes, mas a potência necessária para escoar os fluidos, começa a subir.

Desse modo, as melhores vazões para se trabalhar com tais condições de escoamento encontram-se em torno deste intervalo de operação expostos na Tabela 4. Esta região fora escolhida levando-se em consideração que bombas convencionais, operando com as

mesmas vazões, possuem potências entre 370W a 500W, como é o caso da Bomba Submersa *Lifetech*.

Ainda sobre a potência de bombeamento, observa-se que, para os valores correspondentes a bomba de óleo, têm-se um visível decaimento, claramente devido a redução da perda de carga. Neste grupo de simulações pode-se afirmar que a vazão ideal de injeção de água deve ser menor que 46% da vazão de óleo e gás, ou seja, a vazão de água não pode ultrapassar 0,007912458 m³/s.

4. CONCLUSÕES

Diante das simulações dos escoamentos monofásico de óleo e de água, e trifásico óleo pesado, água e gás, em dutos curvados conclui-se que:

- Existe uma significativa redução na perda de carga ao longo do escoamento para os casos trifásicos em comparação com o escoamento monofásico de óleo, comprovando a eficiência do transporte de óleos pesados por meio da técnica *core-flow*;
- A manutenção do filme de água ao longo do escoamento torna-se sensível em regiões onde a geometria se faz complexa permitindo situações adversas como variações do campo de velocidade e recirculações como é o caso da curvatura.

- A vazão ideal de água não deve ser muito baixa nem extremamente alta, pois, no primeiro caso não forma o perfil anular inviabilizando a redução desejada da perda de carga. No segundo, vazões excedentes podem gerar um consumo desnecessário de energia e até mesmo afetar a estabilidade do perfil anular.
- Existe um intervalo de operação no qual se têm melhor aproveitamento em questões de perda de carga e potência de bombeamento. Este, está diretamente relacionado com a capacidade máxima necessária de injeção de água.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos a ANP/UFCG/PRH-42, a CAPES, ao CNPq, a FINEP, e a PETROBRÁS por todo apoio financeiro a UFCG e ao Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos pela estrutura disponibilizada.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, T. E. V. **Transporte de óleos pesados e ultraviscosos via core-flow:**

aspectos geométricos e termofluidodinâmicos. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, 2014.

ANSYS, CFX-Theory Manual, 2009.

Brasil, Ministério de Minas e Energia – **Plano de Eficiência Energética**, www.mme.gov.br, acessado em Outubro 2015.

SILVA, F. N. **Estudo numérico do escoamento trifásico (água-óleo pesado-gás) tipo core-flow em uma conexão “T”.** in: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS 6, Santa Catarina, 2011.

TREVISAN, F. E. **Padrões de fluxo e perda de carga em escoamento trifásico horizontal de óleo pesado, água e ar.** 2003. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo) -Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

WEGMANN, A.; MELKE, J.; ROHR, P. R. Three phase liquid-liquid-gas flows in 5.6 mm and 7 mm inner diameter pipes. **International Journal of Multiphase Flow**, v.33, n.5, pp.484-497, 2007.