



Copyright 2004, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico Científico foi preparado para apresentação no 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, a ser realizado no período de 2 a 5 de outubro de 2005, em Salvador. Este Trabalho Técnico Científico foi selecionado e/ou revisado pela Comissão Científica, para apresentação no Evento. O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, Sócios e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho será publicado nos Anais do 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás

SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO ISOTÉRMICO DE PETRÓLEO E ÓLEO DIESEL EM JUNÇÕES TIPO “T”

Rodrigo Moura da Silva¹, Antonio Gilson Barbosa de Lima²

¹ UFCG/CCT/DEM, Bolsista ANP/UFCG-PRH-25

² Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia,
Departamento de Engenharia Mecânica, Av: Aprígio Veloso, 82, Bodocongó, Campina
Grande-PB, Brasil, CEP 58109-970, e-mail: gilson@dem.ufcg.edu.br

Resumo – escoamento monofásico de fluido em dutos têm sido usado em várias aplicações industriais tais como transporte de petróleo, refrigeração ambiental, irrigação, entre outros. Neste sentido, este trabalho estuda o escoamento de petróleo e óleo diesel em conexões tipo T. As equações governantes escritas no sistema de coordenadas generalizadas são resolvidas pelo método dos volumes finitos usando um arranjo de variáveis co-localizada, o esquema WUDS como função de interpolação dos termos convectivos, e o método SIMPLEC para o acoplamento pressão-velocidade. Todas as simulações foram realizadas usando o código computacional CFX-3D. Resultados numéricos das distribuições de velocidade e pressão são apresentados e analisados. O estudo da distribuição de velocidade e pressão do óleo bruto e diesel, no interior do duto, permitirá aumentar a confiabilidade operacional e a vida útil da malha de dutos, prevendo a existência de vazamentos, obstrução do fluxo de fluido e minimizando os custos operacionais.

Palavras-Chave: fluxo monofásico; petróleo; óleo diesel, volumes finitos, conexões

Abstract – Monophase fluid flow in pipe has been used in several industrial applications as transport of petroleum, environmental refrigeration, and irrigation, among others. In this sense, this work presents a study of the single-phase flow through T-joint. The governing equations written in the boundary fitted coordinates system are resolved using the finite volume method using an arrangement of variables co-located, the WUDS scheme as interpolation function to the convective terms, and the method SIMPLEC for the link of pressure-velocity. All the simulations were accomplished using the computational code CFX[®] 3D. Numerical results of the velocity and pressure distribution along of the T-joint are presented and analyzed. The study of the velocity and pressure distribution of the oil and diesel, inside the T-joint will allow to increase the operational reliability and the useful life of the pipe grid, foreseeing the existence of leaks, obstruction of the fluid flux and minimizing the operational costs.

Keywords: single-phase flow, petroleum, diesel oil, finite-volume, T-joint

1. Introdução

Petróleo, derivados e álcool podem ser transportados por navios ou dutos. Os dutos são classificados em oleodutos (transporte de líquidos) ou gasodutos (transporte de gases) e em terrestres (construídos em terra) ou submarinos (construídos no fundo do mar). Os oleodutos que transportam derivados e álcool são também chamados de polidutos.

Para se determinar o método de transporte adequado para um produto, fatores econômicos, ambientais e de segurança devem ser considerados. Em geral, o duto é o sistema mais seguro e econômico de transporte de petróleo, derivados, álcool e gás. Além disso, através de um planejamento cuidadoso, os dutos podem ser construídos de modo que os danos ambientais sejam minimizados tanto durante quanto após a fase de construção. Por esse motivo qualquer tipo de atividade que torne mais econômica a construção ou operação de um duto, é sempre refletida de forma muito significativa no montante de recursos que a companhia deixa de gastar.

As variações de pressão num sistema de escoamento resultam de variações em elevação ou de velocidade de escoamento (devido a variações de área) e devido à fricção. O efeito de fricção age no sentido de diminuir a pressão, isto é, o de causar uma perda de pressão. Na linha de dutos, as perdas de pressão são divididas em perdas principais, devidas à fricção no escoamento completamente desenvolvido (escoamento nos quais o perfil de velocidade não varia ao longo da direção do escoamento), em partes do sistema com área constante, e em perdas secundárias, devidas ao escoamento através de conexões e a efeito de fricção em outras partes da linha de duto com área variável (quando a configuração da tubulação se expande e se contrai) (Fox e McDonald, 1981).

Denomina-se conexões, as diversas peças, tais como curvas, joelhos, tês, etc., que ligam os tubos entre si, afim de permitir a mudança de direção no fluxo de tubulação. No caso do escoamento através de uma linha de duto requerer a passagem através de uma variedade de conexões, curvas ou variações abruptas de área, perdas de carga adicionais ocorrem, principalmente como resultado da separação do fluido da parede do duto à medida que ele passa através do dispositivo, e constitui, portanto, um arraste de forma. Para um sistema com tubos pequenos, elas são normalmente maiores do que as perdas numa tubulação de linha reta (Bastos, 1983). Muito embora, as perdas de pressão oriundas da passagem do fluido em válvulas, conexões, contração e expansão, sejam denominadas perdas secundárias, elas podem se constituir numa fração significativa da perda total do sistema (Sissom e Pitts, 1979).

Visando dar uma contribuição na área de escoamento de fluidos petrolíferos (petróleo e seus derivados), o presente trabalho tem como objetivos: modelar matematicamente o escoamento isotérmico de petróleo e óleo diesel em uma junção tipo T, e simular a distribuição de velocidade e pressão dos fluidos ao longo da conexão, usando o software CFX® 3D.

2. Modelagem Matemática

A modelagem matemática para descrever o escoamento de um fluido monofásico no interior de dutos irregulares é constituída pelas seguintes equações de conservação (CFX-User Manual, 1997):

❖ Equação da continuidade:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (1)$$

onde $\vec{U} = (u, v, w)$ são as componentes da velocidade do fluido, ρ é a densidade e t é o tempo.

❖ Equação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{U}) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \otimes \vec{U}) = \vec{B} + \nabla \cdot \vec{\sigma} \quad (2)$$

onde $\vec{B}$ representa as forças de campo e $\vec{\sigma}$ representa as tensões de cisalhamento, dada por:

$$\vec{\sigma} = -p\vec{\delta} + \left(\zeta - \frac{2}{3}\mu\right)\nabla \cdot (\vec{U}\vec{\delta}) + \mu(\nabla \vec{U} + (\nabla \vec{U})^T) \quad (3)$$

onde μ representa a viscosidade absoluta do fluido e ζ a viscosidade dinâmica.

Visando simplificar o modelo e a solução das equações governantes, as seguintes considerações foram assumidas: escoamento laminar; tridimensional; incompressível; não-isotérmico; regime permanente; propriedades termo-físicas constantes; sem existência de força de corpo. As seguintes condições de contorno foram usadas:

- ❖ $u = v = 0$ e $w = w_0$ na entrada do sistema para $\forall (x, y)$;
- ❖ $u = v = 0$ para $\forall (x, y) / x^2 + y^2 = R^2$;
- ❖ Na saída, usou-se condição de contorno parabólica para as variáveis de interesse.

3. Solução Numérica

Para geração da malha numérica e solução numérica das equações governantes utilizou-se o software CFX® 3D versão 4.4. Este software é um simulador comercial para resolução numérica de problemas envolvendo mecânica dos

fluidos e transferência de calor. Ele emprega a metodologia de volumes finitos (Patankar, 1980; Versteeg e Malalasekera, 1995; Fortuna, 2000, Maliska, 2004) utilizando malhas estruturadas, porém com flexibilidade de adaptação a geometrias complexas através do uso de coordenadas curvilíneas generalizadas (Thompson et al., 1985; Fletcher, 1991; Warsi, 1992; Ferziger e Péric, 2002; Maliska, 2004) e a possibilidade de resolução com a metodologia de multidomínios.

Para a obtenção da solução do problema, utilizou-se o esquema WUDS de interpolação para os termos convectivos e método SIMPLEC para o acoplamento pressão-velocidade. A Tabela 1 apresenta os dados usados na simulação. Um critério de convergência de 10^{-10} kg/s foi usado para a massa. A velocidade dos fluidos nas entradas da junção foi de 0,01 m/s para o óleo bruto e diesel.

Tabela 1. Propriedades termofísicas do petróleo e óleo diesel usadas na simulação.

Fluido	Propriedade		Fonte
Petróleo	ρ	951 kg/m ³	-----
	μ	0,5 N.s/m ²	-----
Diesel	ρ	845 kg/m ³	-----
	μ	0,004 N.s/m ²	-----

A Figura 1 ilustra uma vista em perspectiva da junção usada nas simulações. Ela é composta de duas entradas com diâmetro de 0,2 m, e uma saída com diâmetro de 0,1m, dando uma razão de aspecto de 0,5. O trecho reto do maior diâmetro mede 1,2m enquanto que o trecho de menor diâmetro tem dimensão de 0,3m. O formato da junção e as propriedades físicas dos fluidos foram arbitrados, apenas tentando se aproximar da realidade.

4. Resultados e Discussões

4.1. Malha Numérica

Todo o trabalho foi desenvolvido no Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos, do Departamento de Engenharia Mecânica, no Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande. A máquina utilizada para a simulação do escoamento foi um Pentium IV de 1.7 Ghz, com 512 Mb RAM e HD de 40 Gb. A Figura 1 ilustra detalhes da malha utilizada, que contém 17785 elementos, e 22892 pontos obtidos após vários refinamentos.

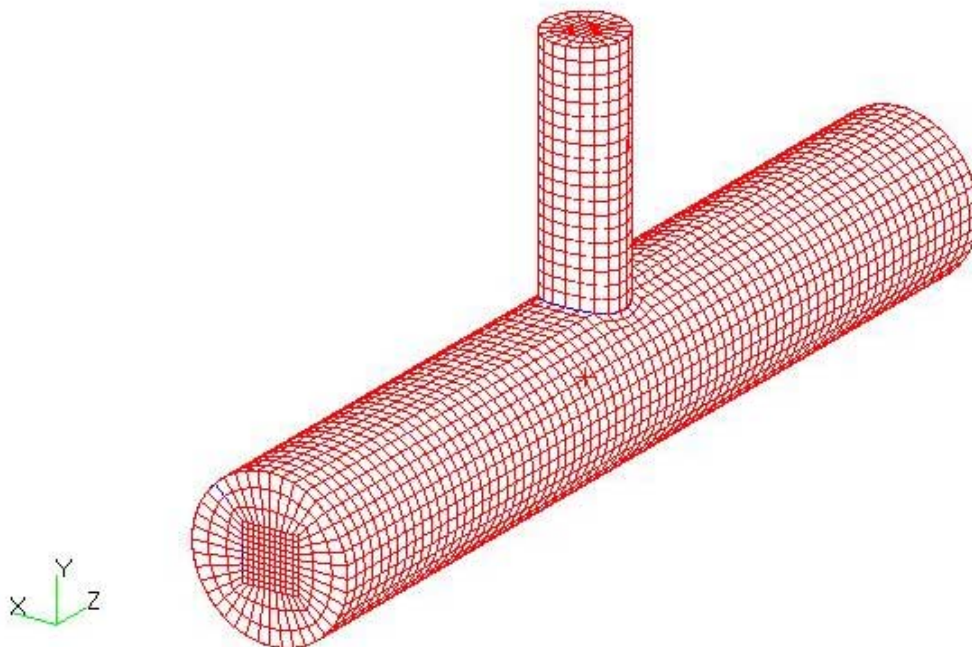


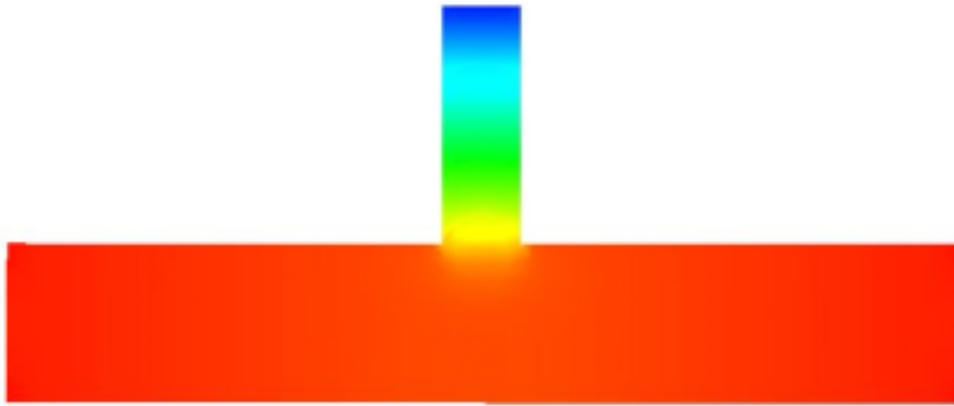
Figura 1. Vista em perspectiva da junção tipo T usada nesta pesquisa.

4.2. Resultados Numéricos

Nas simulações realizadas foi utilizado para o diesel, com um fluxo de massa de 0,5280 kg/s, um tempo de CPU de 127s, para 192 iterações realizadas. Para o óleo, realizou-se 365 iterações, num tempo de CPU de 184, para um fluxo de massa de 0,5951 kg/s.

A Figura 2a-b descreve o campo de pressão ao longo da junção para o petróleo e óleo diesel, repectivamente. Verifica-se que existe um decréscimo da pressão ao longo do escoamento, com uma pressão máxima nas entradas da junção e mínima na saída, conforme esperado. Os maiores gradientes de pressão estão próximos a redução abrupta de diâmetro, decrescendo gradativamente ao longo do trecho de menor diâmetro. Um $\Delta P = 53,36$ Pa e de 7,25 Pa foram necessários para deslocar o óleo bruto e o óleo diesel em toda a conexão, respectivamente, sem considerar os efeitos da gravidade. A pressão por sua vez praticamente não varia com x e y (como esperado). Considerando todo o duto como sendo reto de comprimento 1,5m e diâmetro de 0,2m, a perda de carga é de $\Delta P = 7,30$ Pa para o óleo, e de 0,11 Pa para o diesel. Isto corresponde uma diferença de 46,06 Pa para o óleo, e de 7,14 pa para o diesel.

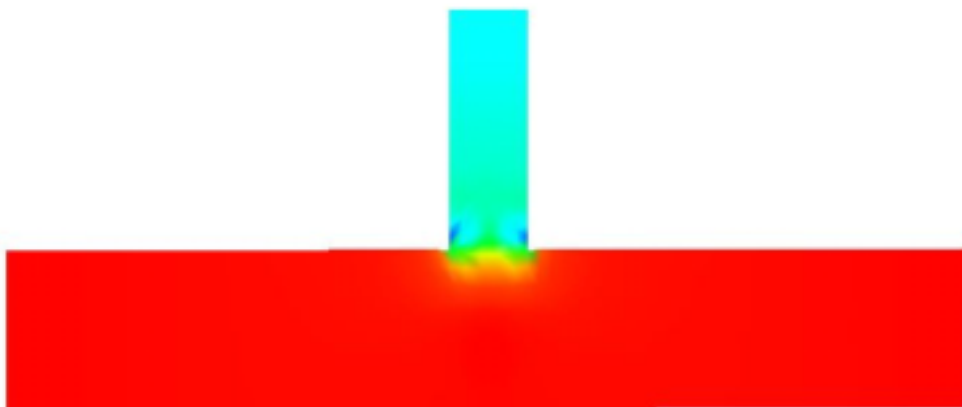
Pressao (oleo)
[Pa]

CFX

a)

Pressao (diesel)
[Pa]

CFX

b)

Figura 2. Distribuição de pressão do fluido através da junção tipo T. a) petróleo; b) óleo diesel.

A Figura 3a-b ilustram o campo de velocidade na direção axial ao escoamento para o óleo e diesel, respectivamente. Pode-se observar que a velocidade é zero na parede e vai aumentando em direção ao centro do duto, onde atinge seu valor máximo. Verifica-se também a formação da camada limite e a região de entrada hidrodinâmica. Verifica-se que à medida que o fluido escoar, a velocidade no centro do duto vai aumentando (para manter o mesmo fluxo de massa na entrada) até, se possível, atingir a região completamente desenvolvida. Na região de mudança de seção abrupta observa-se um aumento considerável de velocidade na direção da saída.

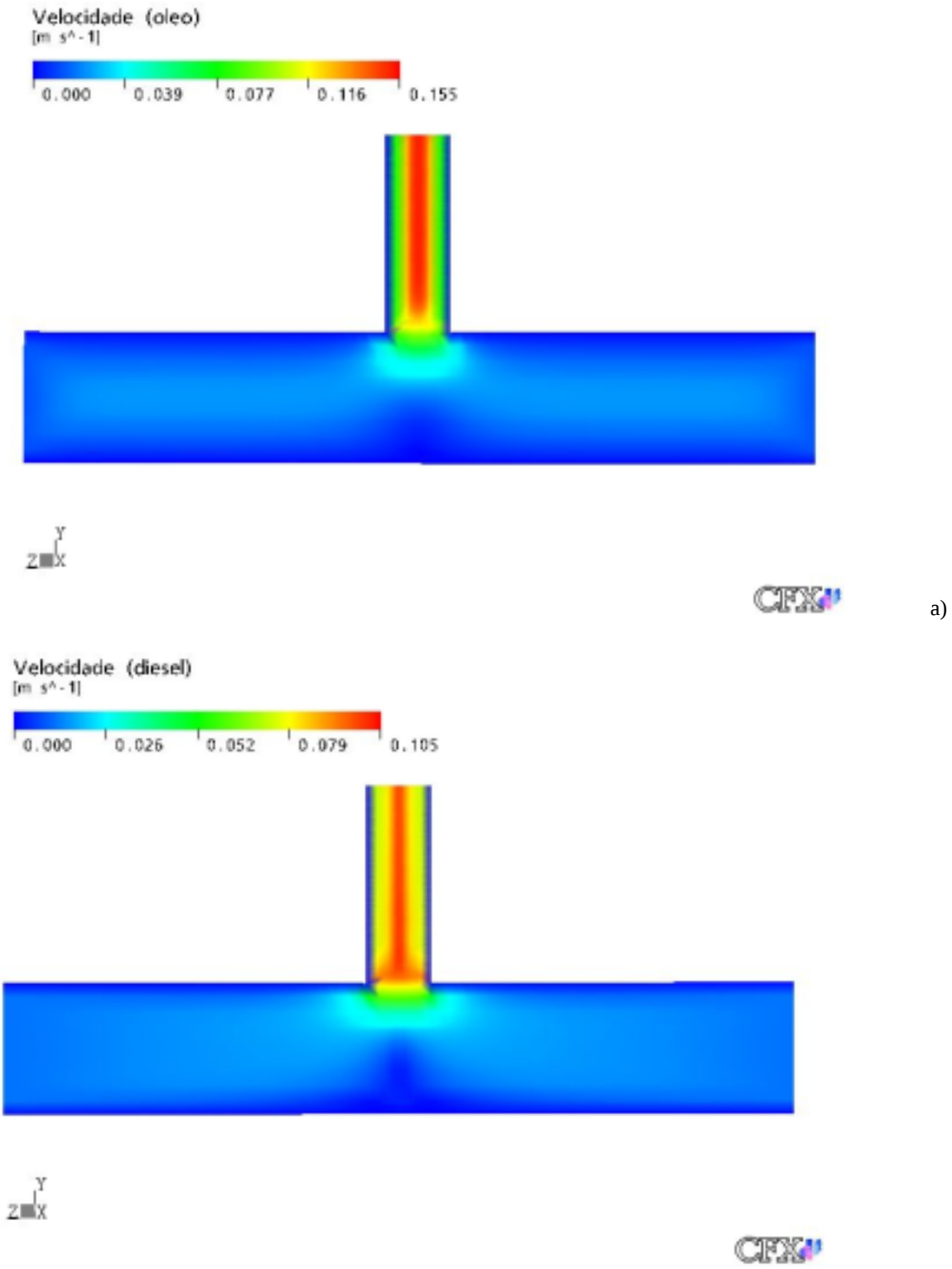


Figura 3. Distribuição de velocidade do fluido através da junção tipo T. a) petróleo; b) óleo diesel.

Comparando-se as Figuras 2 e 3 observa-se que todo o trecho reto de maior diâmetro se encontra na região de entrada hidrodinâmica, e que praticamente todo o escoamento se dá com perfil de velocidade uniforme até a entrada da junção, onde a partir daí tende a atingir a condição de escoamento completamente desenvolvido. Devido a menor perda

de carga no diesel, sua velocidade na saída da junção tende a ser menor. Neste escoamento, os números de Reynolds foram de 3,80 e de 422,50, para o petróleo e diesel, respectivamente, na entrada da junção, implicando num escoamento laminar.

Na região de mudança de seção, ocorre a existência de escoamentos secundários (produzido por forças centrífugas) constituído por uma par de turbilhões longitudinais, que caso ocorra aumentam a transferência de calor (Incropera e DeWitt, 2002). Este escoamento secundário é devido ao fato de que as partículas próximas ao centro do tubo possuem uma alta velocidade e ao serem acionadas por uma força centrífuga às direcionam para a parede. O escoamento secundário resultante está direcionado do centro para a parede e da parede para o centro, tipo recirculação, simétrica em relação ao eixo do duto. Além disso, a curvatura tem efeitos fortes na perda de carga em escoamentos laminares (Burmeister, 1983). No entanto, estes fenômenos não foram notados com grande intensidade devido à baixa velocidade dos fluidos escoando no duto.

5. Conclusões

Considerando os resultados obtidos, pode-se concluir de maneira geral que:

- ✓ O software CFX® 4.4 mostrou-se eficiente para descrever o escoamento de petróleo incluindo os efeitos da transferência de calor, tendo em vista a boa concordância entre os resultados numérico e analítico dos perfis de velocidade e temperatura numa seção do duto.
- ✓ Um $\Delta P = 53,36$ Pa e de 7,25 Pa. foram necessários para deslocar um fluxo de massa de óleo bruto de 0,5951 kg/s e de 0,5280 kg/s para o óleo diesel em toda a conexão, respectivamente, sem considerar os efeitos da gravidade.
- ✓ Todo o escoamento do fluido se dá praticamente na região de entrada hidrodinâmica com perfil da velocidade constante e uniforme no trecho de maior diâmetro.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES, ao CNPq, a ANP/UFCG-PRH-25, a FINEP e o CT-PETRO, pelo apoio financeiro concedido e aos pesquisadores referenciados que com suas pesquisas, ajudaram no melhoramento deste trabalho.

7. Referências

- BASTOS, F. A., *Problemas de mecânica dos fluidos*, Editora santuário, Aparecida, 1983.
- BURMEISTER, I. C., *Convective heat transfer*, John Wiley & Sons, New York, 1983.
- CFX 4.4, *Solver manual*. CFX International, AEA Technology, UK, 1997.
- FERZIGER, J. H., PÉRIC, M., *Computational methods for fluid dynamics*, Third Edition, Ed. Springer, Berlin, 2002.
- FLETCHER, C. A. J., *Computational techniques for fluid dynamics*, Vol. II, Ed. Springer, Berlin, 1997.
- FORTUNA, A. O., *Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: conceitos básicos e aplicações*; Ed. Universitária de São Paulo, São Paulo, 2002.
- FOX, R. W., McDONALD, A. T., *Introdução à mecânica dos fluidos*, Ed. Guanabara Dois S. A., Rio de Janeiro, Brasil, 1981.
- INCROPERA, F. P., DeWITT, D. P., *Fundamentals of heat and mass transfer*, Ed. John Wiley & Sons, New York, 2002.
- MALISKA, C. R., *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional*, Ed. LTC, Rio de Janeiro, 2004.
- PATANKAR, S. V., *Numerical heat transfer and fluid flow*, Ed. Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1980.
- SISSOM, L. E.; PITTS, D. R., *Fenômenos de transporte*, Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1979.
- THOMPSON, J. F., WARSI, Z. U.A., MASITN, C. W., *Numerical grid generation*, Ed. North-Holland, New York, 1985.
- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W., *An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method*; England: Pearson education limited; 1995.
- WARSI, Z.U.A., *Fluid dynamics: theoretical and computation approaches*, Ed. CRC Press, Boca Raton, USA, 1992.