

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO DE GÁS NATURAL EM DUTO CILÍNDRICO ELÍPTICO USANDO O SOFTWARE CFX-3D

Maitozambuh Araújo Cadê

UFCG/CCT/DEM/ Bolsista ANP (PRH-25)

Vinicio de Sousa Melo

UFCG/CCT/DEM/REDE COOPERATIVA DE MODELAGEM COMPUTACIONAL

Janailson Delfino de Sousa

UFCG/CCT/DEM/ Bolsista ANP (PRH-25)

Marcelo Antonio de Figueiredo Benevides Irineu

UFCG/CCT/DEM/ Bolsista Mestrado ANP (PRH-25)

Antonio Gilson Barbosa de Lima

UFCG/CCT/DEM Av: Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Caixa Postal 10069, CEP 58109-970, Campina Grande-PB, E-mail: gilson@dem.ufpb.br;

Resumo. *O gás natural consiste numa mistura de gases inorgânicos e hidrocarbonetos saturados contendo principalmente metano, cuja composição qualitativa e quantitativa depende dos fatores envolvidos no processo de produção, coleta, condicionamento e escoamento do gás. Uma vez extraído do subsolo, o gás natural deve ser transportado até as zonas de consumo. O transporte de gás, desde as jazidas até estas zonas, é realizado geralmente através de tubulações de grande diâmetro, denominadas gasodutos, o qual pode ser realizado na fase gasosa ou liquefeita. Em sua fase gasosa, o transporte do gás, geralmente é realizado a altas pressões na temperatura ambiente por meio de dutos. Neste sentido, o objetivo desta pesquisa é apresentar uma modelagem matemática para predizer o escoamento do gás natural em duto cilíndrico de seção transversal elíptica, considerando o escoamento laminar, isotérmico, incompressível, tridimensional e em regime permanente, com propriedades termo-físicas constantes. A formulação e a solução numérica das equações de conservação foram obtidas utilizando o método dos volumes finito usando o sistema de coordenadas generalizadas. Para o acoplamento pressão-velocidade foi utilizado o algoritmo SIMPLEC, e o esquema de interpolação UPWIND como função de interpolação para os termos convectivos. Resultados das distribuições de velocidade e pressão no interior de dutos com várias razões de aspecto são apresentadas e analisadas. Verificou-se que a perda de pressão num duto elíptico é maior do que num duto circular operando sob as mesmas condições de fluxo de massa. O estudo da distribuição de velocidade e pressão do óleo no interior do duto permitirá aumentar a confiabilidade operacional e a vida útil da malha de dutos, pela prevenção de vazamentos e minimização de custos operacionais.*

Palavras-chave: gás natural, fluxo, simulação, volumes finitos, cilindro elíptico.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente o gás natural é a terceira maior fonte de energia primária do mundo, somente superado pelo óleo e o carvão. No Brasil, a oferta total de energia primária mostra uma participação

relativamente elevada de fontes renováveis, algo em torno de 60%, onde o maior percentual é de origem hidráulica. As fontes não-renováveis, oriundas dos combustíveis fósseis e minerais, compõem os 40%, destacando-se o petróleo com maior percentual, e logo em seguida o gás natural. O gás natural pelas suas características termo-físico-químicas tem sido usado em diversas áreas industriais tais como: termelétricas, cerâmicas, cimento, vidro e automóveis. Sua participação no mercado brasileiro vem crescendo a cada dia, devido a vários aspectos tais como: surgimento de novas utilizações desta fonte de energia, substituição de outros energéticos, suas características, modernização da indústria e do comércio, reservas brasileiras e importação do gás (Gás e Energia, 2001; PB Gás, 2001; Santana, 2001).

Os dutos tradicionais utilizados para transportar o gás natural, desde as jazidas até as zonas de consumo, apresentam uma seção transversal circular e são desenvolvidos de forma a evitar vazamentos, tornando-os mais seguros. No caso de vazamento o risco de explosão é eminente.

Neste sentido, visando ampliar a pesquisa relativa ao escoamento de fluidos monofásicos no interior de dutos irregulares, o objetivo deste trabalho é simular numericamente o escoamento de gás natural no interior de dutos cilíndricos de seção transversal elíptica, considerando o escoamento laminar, isotérmico, incompressível, tridimensional e em regime permanente, com propriedades termo-físicas constantes.

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:

❖ 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, t é o tempo e ρ é a densidade do fluido..

❖ Equação da quantidade de movimento:

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

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

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

com μ representando a viscosidade absoluta do fluido e ζ a viscosidade dinâmica.

Como aplicação, o modelo foi usado para descrever o escoamento de gás natural em dutos de seção transversal elíptica (Fig. 1). Visando simplificar o modelo e a solução das equações governantes, as seguintes considerações foram assumidas:

- ❖ Escoamento laminar;
- ❖ Regime Permanente;
- ❖ Escoamento tridimensional;
- ❖ Escoamento incompressível;
- ❖ Escoamento isotérmico;
- ❖ Propriedades termo-físicas constantes;
- ❖ Força de corpo desprezíveis.

As seguintes condições de contorno foram usadas:

- ❖ $u = v = 0$ e $w = w_0$ em $z = 0$ para $\forall (x, y)$;
- ❖ $u = v = 0$ para $\forall (x, y) / x^2/L_2 + y^2/L_1 = 1$;
- ❖ Em $z=c$, usou-se condição de contorno parabólica para as variáveis de interesse.

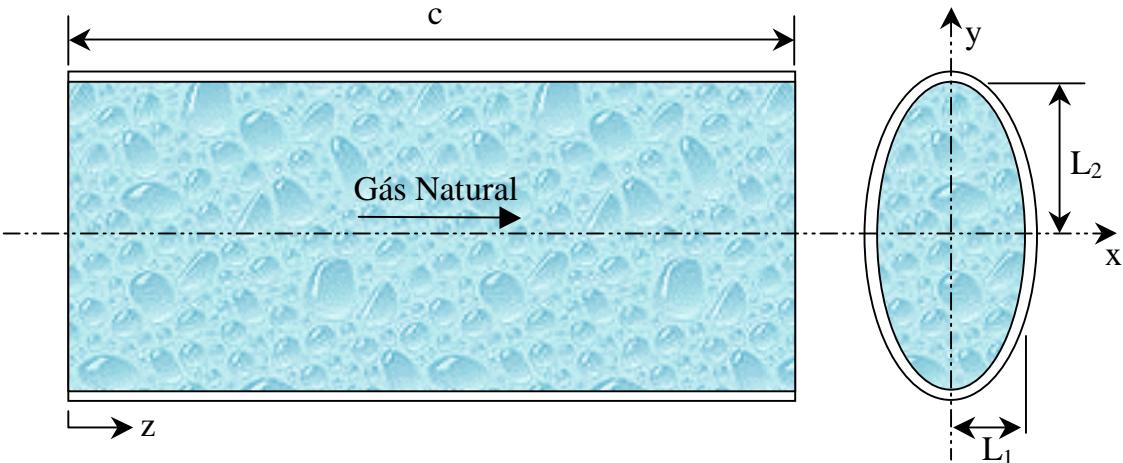


Figura 1. Duto cilíndrico de seção elíptica e suas características.

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; Maliska, 1995; Fortuna, 2000) 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; Maliska, 1995; Ferziger e Péric, 2002) e a possibilidade de resolução com a metodologia de multidomínios. Para a obtenção da solução do problema, utilizou-se o esquema UDS de interpolação para os termos convectivos e método SIMPLEC para o acoplamento pressão-velocidade. Uma tolerância para a massa de 10^{-10} kg/s foi estabelecida. A Tabela (1) apresenta os dados usados na simulação.

Tabela 1. Dados do gás natural usados em todas as simulações. Fonte: Rosa e Carvalho (2002).

μ (1atm e 20°C)	0,000011 (N.s/m ²)
ρ	0,72 (kg/m ³)

O perfil de velocidade do fluido escoando em duto de seção transversal elíptica, na região completamente desenvolvida é dado por (Kakaç et al., 1987; White, 1991):

$$w(x, y) = \frac{1}{2\mu} \left(-\frac{dP}{dz} \right) \frac{L_1^2 L_2^2}{L_1^2 + L_2^2} \left(1 - \frac{y^2}{L_1^2} - \frac{x^2}{L_2^2} \right) \quad (4)$$

ou ainda;

$$\frac{w}{w_m} = 2 \left(1 - \frac{x^2}{L_2^2} - \frac{y^2}{L_1^2} \right) \quad (5)$$

$$\text{com } w_m = -\frac{1}{4\mu} \frac{dP}{dz} \left(\frac{L_1^2}{1 + \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2} \right) \text{ sendo a velocidade média do escoamento.}$$

A área da seção transversal, o perímetro e o diâmetro hidráulico de um duto cilíndrico elíptico são dados, respectivamente, por (Kakaç et al., 1987):

$$A = \pi L_1 L_2 \quad (6)$$

$$P = 4L_2 E \left[1 - \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2 \right] \quad (7)$$

$$D_h = \frac{\pi L_1}{E \left[1 - \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2 \right]} \quad (8)$$

onde E representa a integral elíptica completa de 2^a espécie. Para maiores detalhes sobre esta integral, as seguintes referências podem ser citadas: Abramowitz e Stegun (1972), Wolfram (1999).

O comprimento de entrada hidrodinâmico é dado por (Kakaç et al., 1987):

$$L_{eh} = \frac{0,5132}{\left[1 + \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2 \right]} \left\{ \frac{E \left[1 - \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2 \right]}{\pi} \right\} D_h Re \quad (8)$$

onde $Re = \rho w_m D_h / \mu$ é o número de Reynolds.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Geração de malha

Para simular o escoamento do gás natural no interior de dutos com duas razões de aspecto (L_2/L_1) foram utilizadas as malhas mostradas nas Figs. (2) e (3). Estas malhas foram geradas utilizando-se coordenadas cartesianas e obtidas após vários refinamentos. Todo o trabalho foi desenvolvido no Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos, do Departamento de Engenharia Mecânica / CCT / UFCG, em micro-computadores Pentium 4 com a seguinte configuração: 1.7Ghz, 512Mb (DDR) de memória RAM e hard disk de 40Gb.

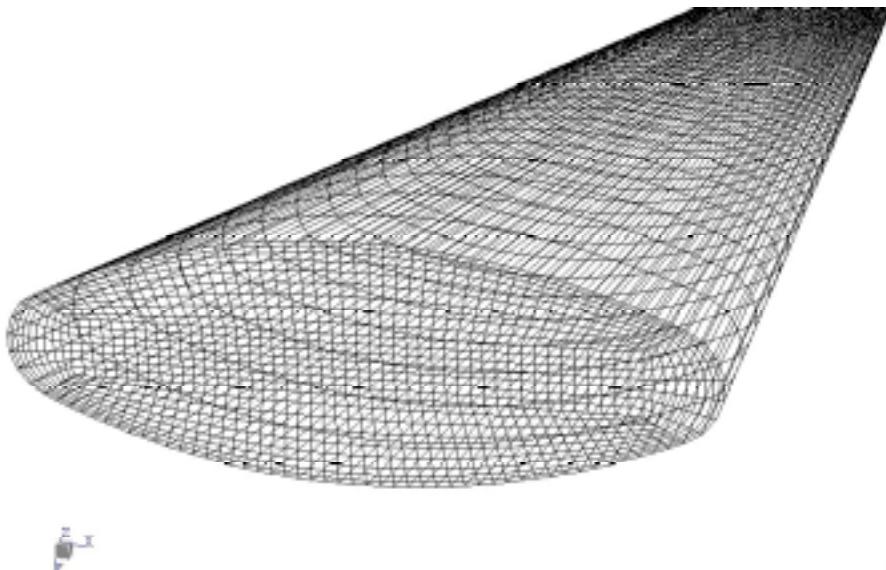


Figura 2. Malha de um duto elíptico com dimensões $L_1 \times L_2 \times C = 0,1 \times 0,3 \times 30 \text{ m}^3$ e 390300 elementos.

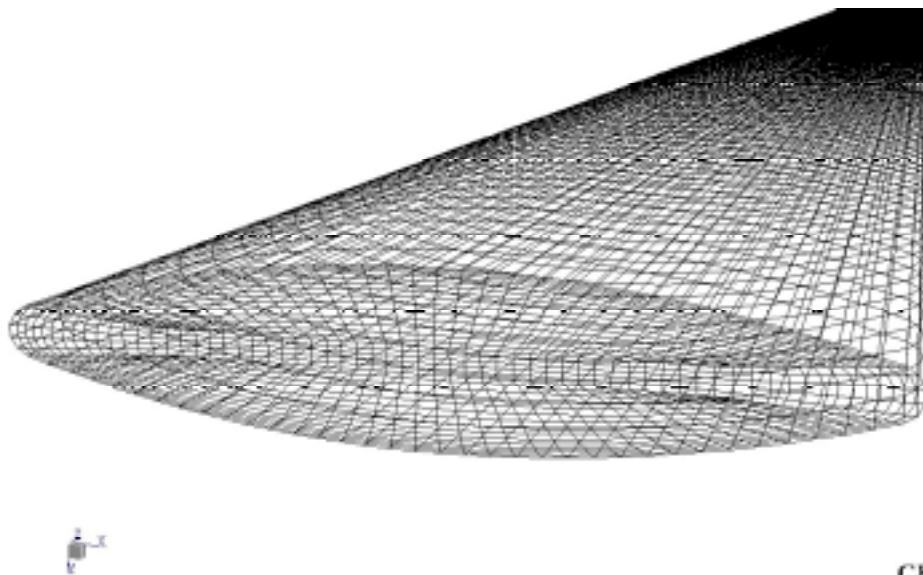


Figura 3. Malha de um duto elíptico com dimensões $L_1 \times L_2 \times C = 0,1 \times 0,5 \times 30 \text{ m}^3$ e 388500 elementos.

O comprimento do duto foi estabelecido baseando-se no cálculo do comprimento de entrada de cada duto, ou seja, a distância em relação à região de entrada do duto em que o escoamento se torna completamente desenvolvido e o perfil de velocidade não se altera mais.

4.2 Validação

Para a validação dos resultados, foi usado para simulação, um duto com $L_1 = L_2 = 0,1\text{m}$ e uma velocidade de entrada de $0,1\text{m/s}$. A Fig. (4) ilustra uma comparação entre os resultados numérico e analítico (Eq. 4) da velocidade na direção axial do escoamento em uma seção transversal em $z = 25\text{m}$, na região completamente desenvolvida, em função da coordenada espacial y , em $x = 0\text{m}$. Verifica-se que um excelente ajuste foi obtido. O erro máximo obtido foi de 0,54% em $y = 0\text{m}$.

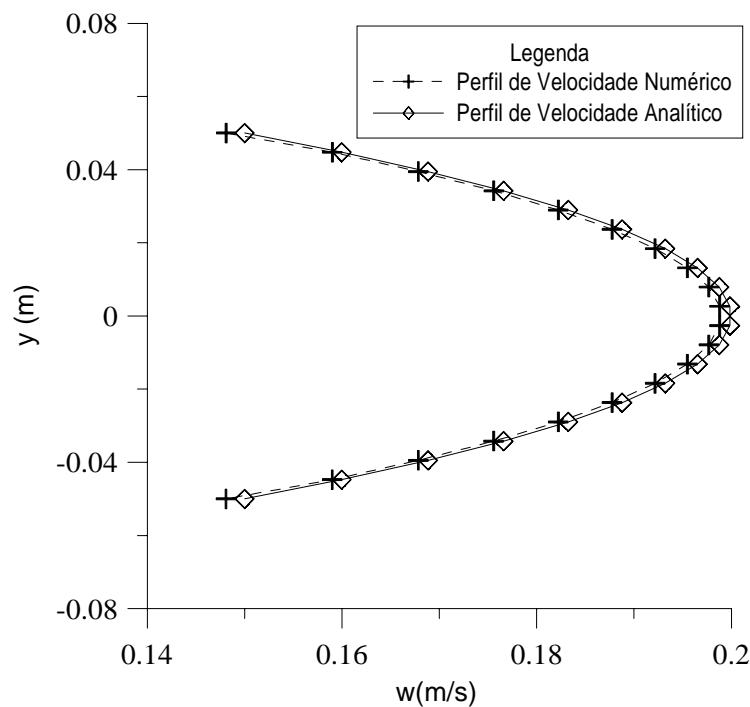


Figura 4. Comparação entre a velocidade do fluido na direção axial obtidas numericamente e analiticamente (Kakaç et al, 1987) em função da coordenada y , em $z = 25\text{m}$.

4.3 Aplicação

Nas Figs (5) e (10) ilustram-se as distribuições de pressão ao longo dos dutos. Observa-se que para que ocorra o escoamento do gás natural no interior do duto é preciso uma diferença de pressão entre os pontos inicial e final do escoamento. No início do duto os gradientes de pressão são mais elevados e ao longo do mesmo a pressão do gás natural diminui gradativamente.

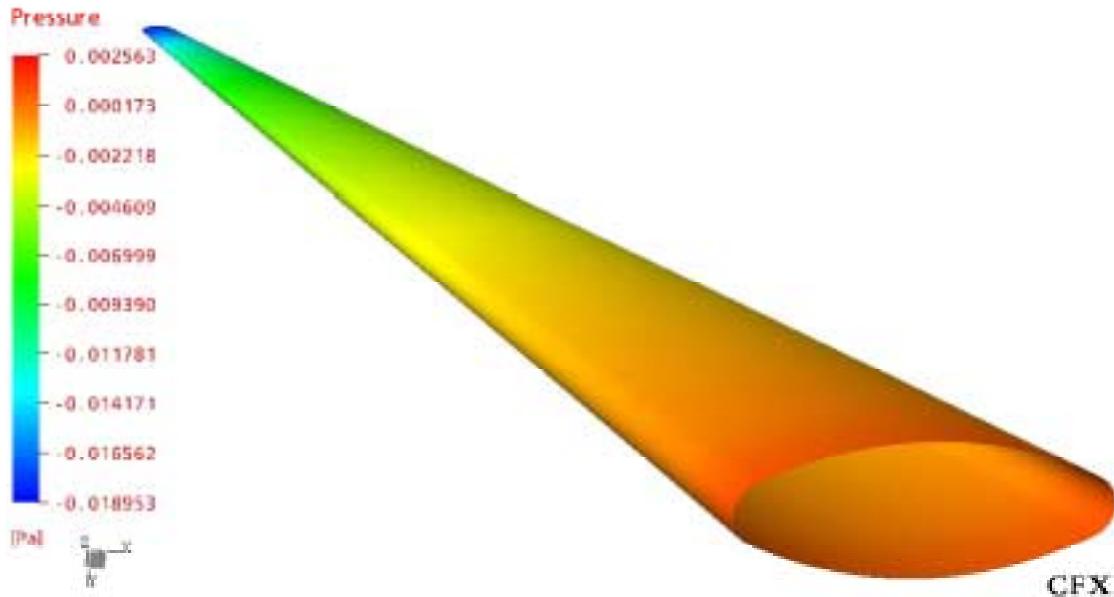


Figura 5. Distribuição de pressão no duto com dimensões $L_1 \times L_2 \times C = 0,1 \times 0,3 \times 30 \text{ m}^3$.

A distribuição de velocidade em várias seções longitudinal e transversal do duto com dimensões $L_1 \times L_2 \times C = 0,1 \times 0,3 \times 30 \text{ m}^3$, que são apresentadas nas Figs. (6) – (9). Observa-se um comportamento bastante similar ao duto circular, como esperado, no entanto, o efeito de ponta nos gradientes de velocidade é bastante visível na direção x.

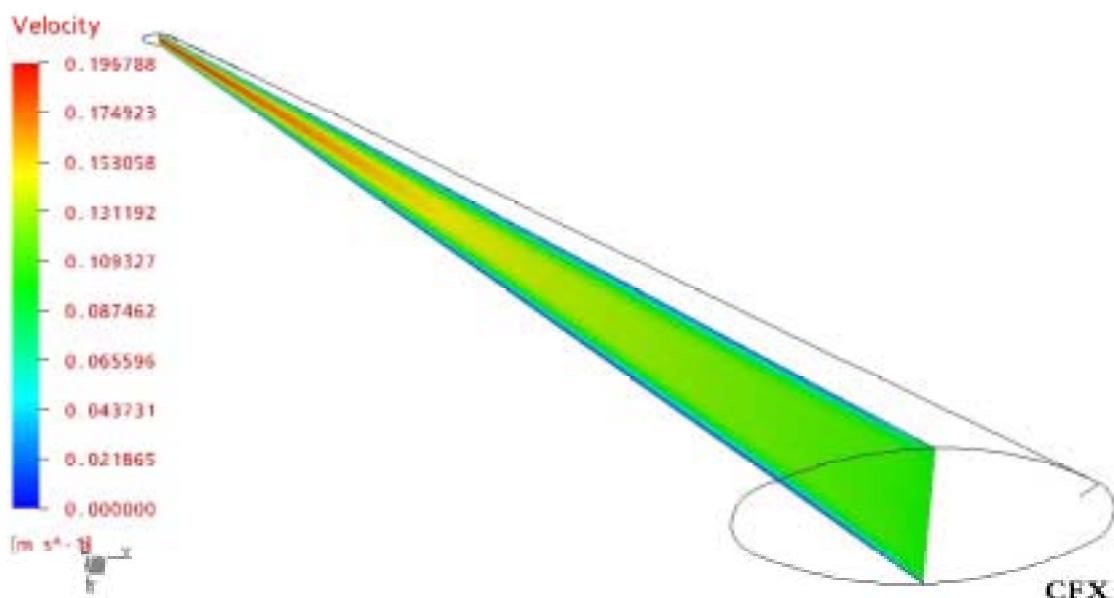


Figura 6. Campo de velocidade ao longo do plano longitudinal yz, para o duto com dimensões $L_1 \times L_2 \times C = 0,1 \times 0,3 \times 30 \text{ m}^3$.

Observa-se nesta figura que nas paredes a massa fluída é freada, como já esperado devido à condição de não-escorregamento. Este efeito é transmitido a todas as camadas de fluido adjacentes, ocorrendo a formação de uma camada limite. Observa-se também que ao longo do duto a velocidade no centro é máxima. Este resultado também já era esperado, visto que, devido à exigência da conservação da massa, é necessária uma aceleração da velocidade na região central do duto para manter a mesma massa escoando.

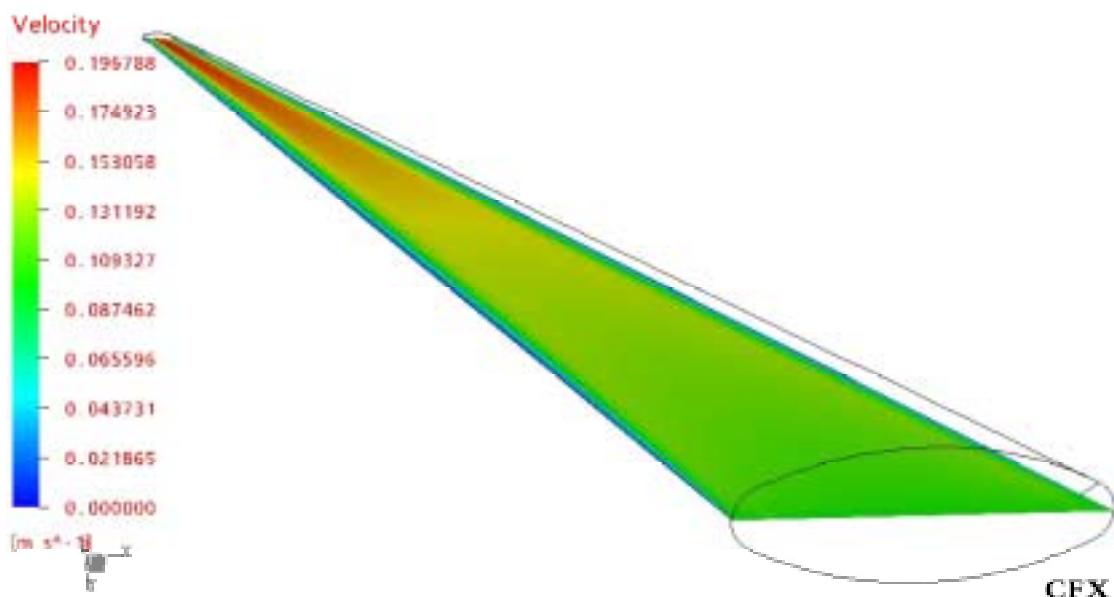


Figura 7. Campo de velocidade ao longo do plano longitudinal xz, para o duto com dimensões $L_1 \times L_2 \times C = 0,1 \times 0,3 \times 30 \text{ m}^3$.

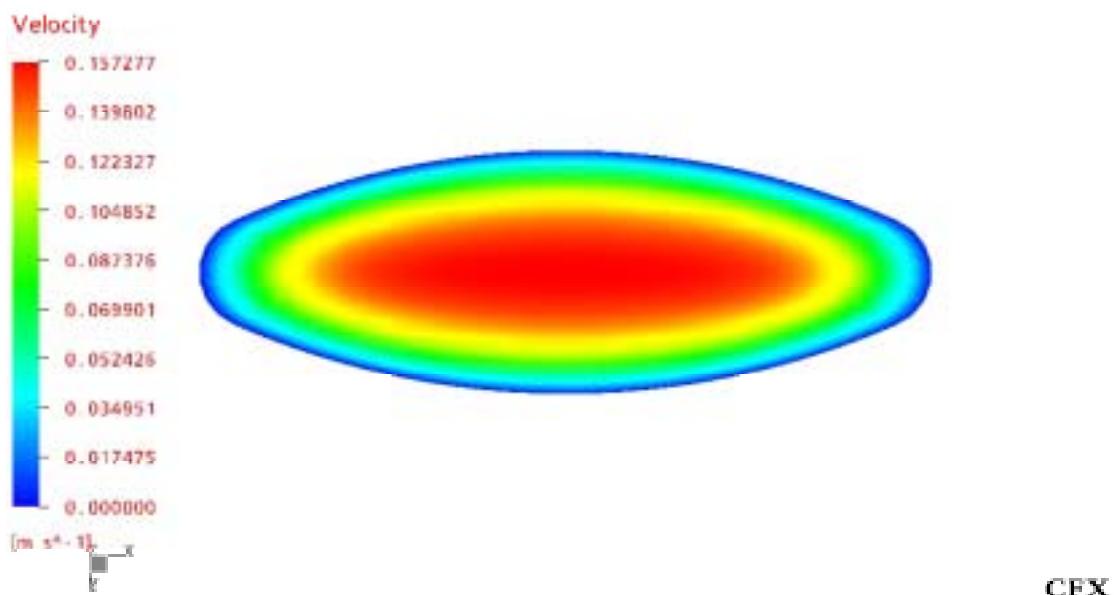


Figura 8. Campo de velocidade para uma seção transversal do duto com dimensões $L_1 \times L_2 \times C = 0,1 \times 0,3 \times 30 \text{ m}^3$ em $z = 5\text{m}$.

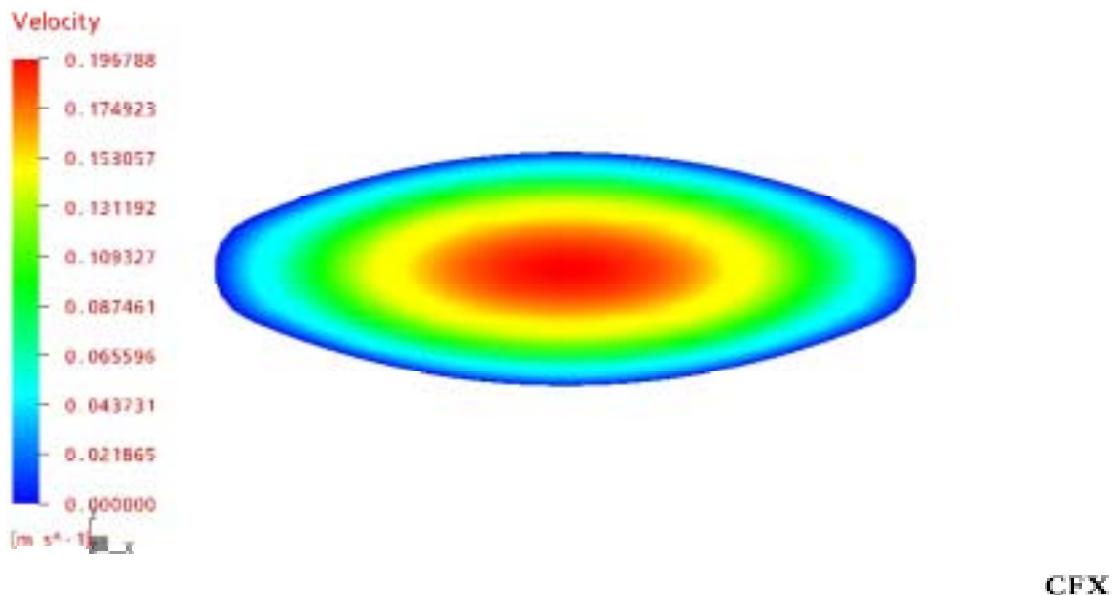


Figura 9. Campo de velocidade para uma seção transversal do duto com dimensões $L_1 \times L_2 \times C = 0,1 \times 0,3 \times 30 \text{ m}^3$ em $z = 30\text{m}$.

A distribuição de velocidade em várias seções longitudinal e transversal do duto com dimensões $L_1 \times L_2 \times C = 0,1 \times 0,5 \times 30 \text{ m}^3$, que são apresentadas nas Figs. (11) – (14). Observa-se um comportamento bastante similar ao duto elíptico anterior, no entanto se observa que na região próxima à região pontiaguda, as variações de velocidade na direção de x são menores. Este efeito vai aumentando ao longo do comprimento do duto.

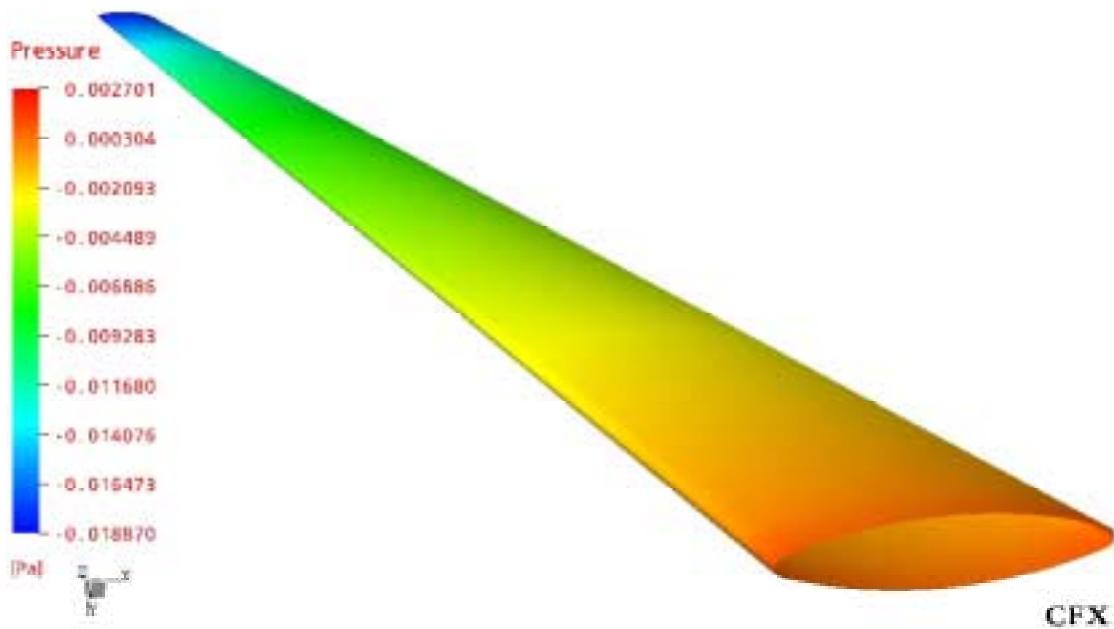


Figura 10. Distribuição de pressão no duto com dimensões $L_1 \times L_2 \times C = 0,1 \times 0,5 \times 30 \text{ m}^3$.

Analizando outros resultados do campo de pressão obtidos nas simulações com outros dutos, pôde-se verificar que à medida que os dutos possuem os semi-eixos L_2 cada vez maiores, mantendo sempre L_1 constante, a diferença de pressão entre os pontos inicial e final (ΔP) do duto, para manter o gás natural escoando a $0,1\text{m/s}$, diminui. Este comportamento está de acordo com Kakaç et al. (1987) e White (1991). No entanto, vale salientar que este comportamento se inverteu para valores

de L_2/L_1 superiores a 3, com pode ser comprovado para os casos apresentados neste trabalho, talvez devido a erros numéricos. A diferença no ΔP , nestes casos foi bastante pequena.

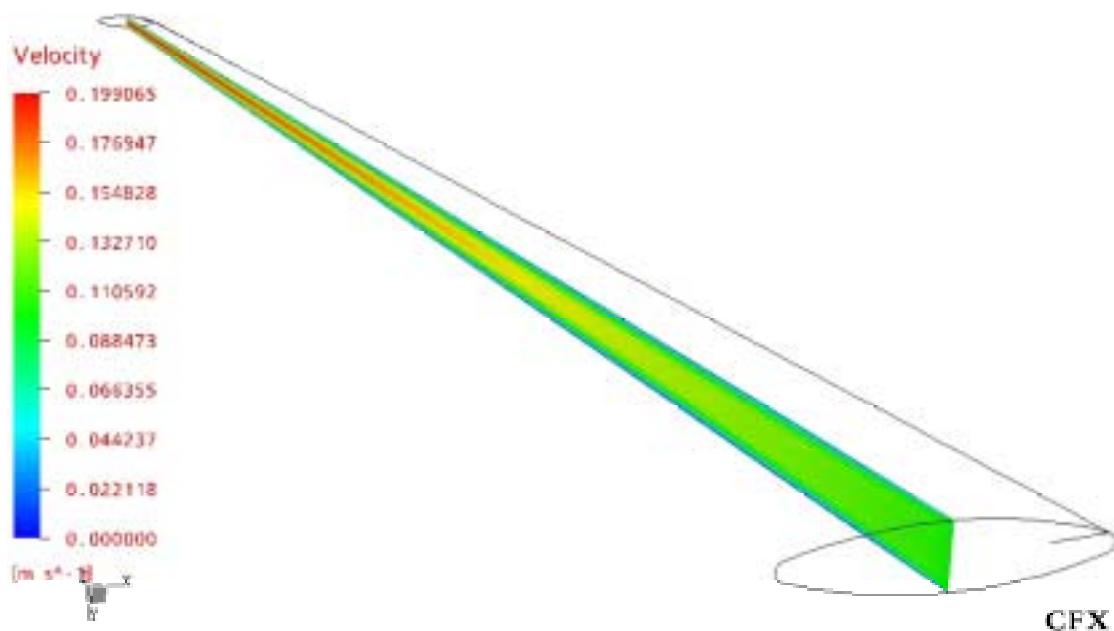


Figura 11. Campo de velocidade ao longo do plano longitudinal yz, para o duto com dimensões $L_1 \times L_2 \times C = 0,1 \times 0,5 \times 30 \text{ m}^3$.

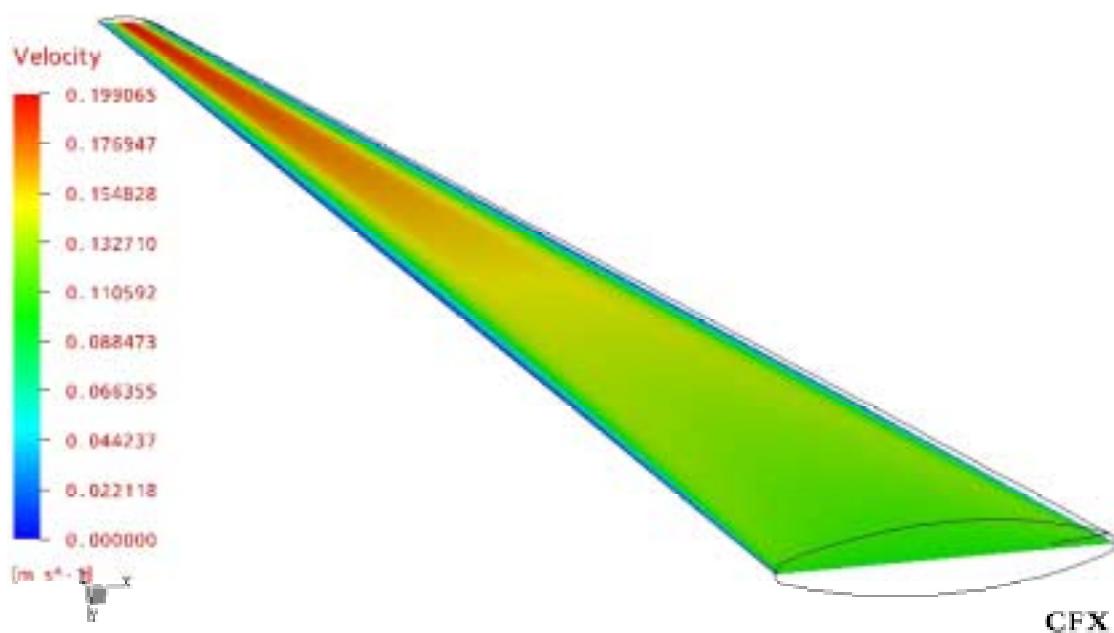


Figura 12. Campo de velocidade ao longo do plano longitudinal xz, para o duto com dimensões $L_1 \times L_2 \times C = 0,1 \times 0,5 \times 30 \text{ m}^3$.

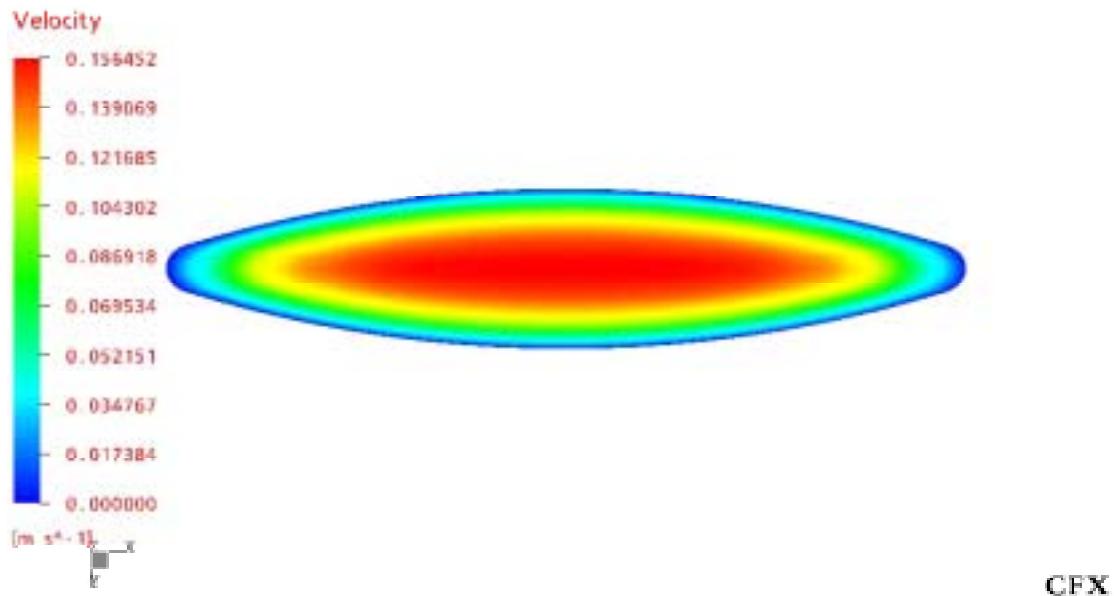


Figura 13. Campo de velocidade para uma seção transversal do duto com dimensões $L_1 \times L_2 \times C = 0,1 \times 0,5 \times 30 \text{ m}^3$ em $z = 5\text{m}$.

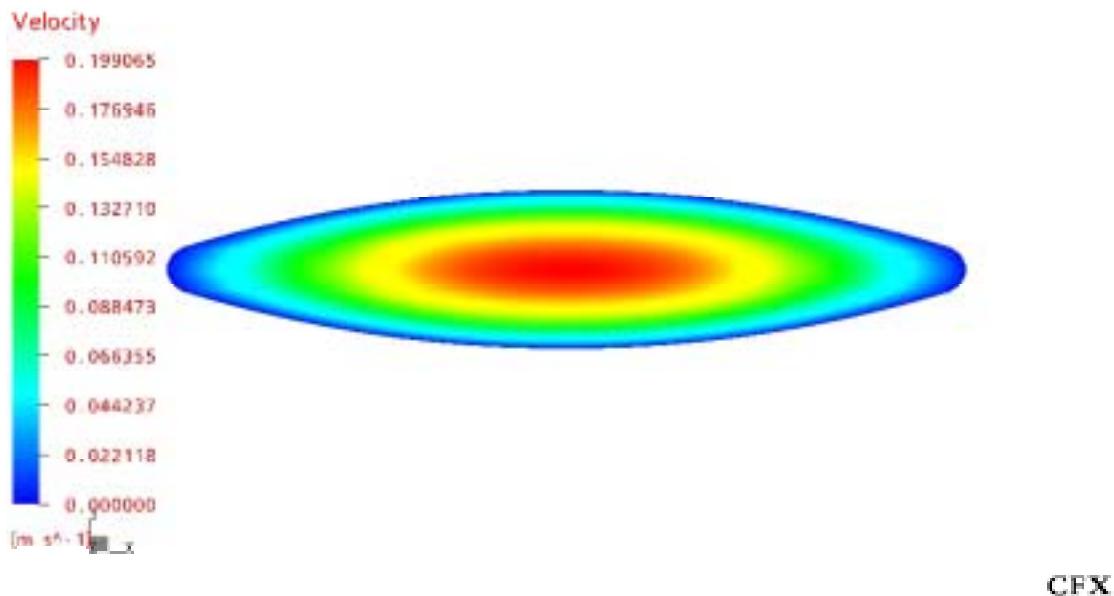


Figura 14. Campo de velocidade para uma seção transversal do duto com dimensões $L_1 \times L_2 \times C = 0,1 \times 0,5 \times 30 \text{ m}^3$ em $z = 30\text{m}$.

Para realizar a comparação entre um duto de seção transversal circular e um duto de seção transversal elíptica, foi usado o duto circular com $L_1 = L_2 = 0,173205\text{m}$ com a mesma área da seção transversal do duto elíptico com $L_1 = 0,1\text{m}$ e $L_2 = 0,3\text{m}$. O escoamento fluido no duto circular foi simulado com a mesma velocidade de entrada usada no duto elíptico que é $0,1\text{m/s}$. Como os dutos possuem a mesma área da seção transversal e a mesma velocidade média, possuem também a mesma vazão volumétrica. Comparando o campo de pressão obtido para o duto circular, com o campo de pressão obtido para o duto elíptico, pôde-se observar que no duto circular tem-se uma diferença de pressão entre os pontos inicial e final de $\Delta P = 0,014347 \text{ Pa}$, enquanto que no duto elíptico o $\Delta P = 0,021516 \text{ Pa}$. Isto significa que é necessária uma diferença de pressão no duto

elíptico aproximadamente 50% maior do que no duto circular, para manter o gás natural escoando a uma mesma vazão. Isto caracteriza uma desvantagem deste tipo de duto para usá-lo como conduto de transporte de fluido isotérmico. E quando houver escoamento fluido não-isotérmico?

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- ❖ Existem gradientes de pressão ao longo do duto e que no início são mais acentuados. O perfil de velocidade encontrado está coerente com o da literatura, onde a velocidade nas paredes é nula e no centro do duto é máxima. O método dos volumes finitos, portanto, mostrou-se satisfatório para descrever o fenômeno;
- ❖ À medida que a razão de aspecto (L_2/L_1) aumenta, a região pontiaguda no duto elíptico vai apresentando menores gradientes de velocidade na direção x, e a perda de pressão vai diminuindo (para $L_2/L_1 \leq 3$);
- ❖ A perda de carga no duto elíptico foi superior a de um duto circular operando sob a mesma vazão volumétrica, em 50%, para uma velocidade de escoamento de 0,1 m/s.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a ANP/MME/MCT - PRH25 (Agência Nacional de Petróleo), a FINEP, a CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro concedido a esta pesquisa e aos pesquisadores referenciados que com suas pesquisas ajudaram no melhoramento deste trabalho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abramowitz, M., Stegun, I. A., 1972, “Handbook of mathematical functions”. Ed. Dover Publications, Inc., New York., USA, 1046p.

Fletcher, C. A. J., 1997, “Computation techniques for fluid dynamics: specific techniques for different flow categories”, Vol. 2, Ed. Springer, Berlim, Alemanha, 493p.

Fortuna, A. O., São Paulo, “Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: conceitos básicos e aplicações”, Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil, 430p.

Fox, R. W., McDonald, A. T., 1981, “Introdução à mecânica dos fluidos”, Ed. Guanabara Dois S. A., Rio de Janeiro, Brasil, p.35.

Gás Energia. portal gás energia. Disponível em: <<http://www.gasenergia.com.br>>. Acesso em: 30 de agosto de 2001.

Kakaç, S., Shah, R. K., Aung, W., 1987, “Handbook of single-phase convective heat transfer”, Chapter 3: Laminar Convective Heat transfer in ducts, Ed. John Wiley&Sons, New York, USA, pp.3.1-3.137.

Maliska, C. R., 1995, “Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional”, Ed. LTC, Rio de Janeiro, Brasil, 424 p.

Patankar, S. V., 1980, “Numerical heat transfer and fluid flow”, Ed. Hemisphere Publishing Corporation, New York, USA, 100p.

Pb Gás. Companhia Paraibana de Gás. Disponível em: <<http://www.pbgas.com.br>>. Acesso em: 31 de agosto de 2001.

Rosa, A., Carvalho, R., 2002, “Previsão de comportamento de reservatórios de petróleo: métodos analíticos”, Ed. Interciência, Rio de Janeiro.

Santana, E. F., 2001, “Gás natural: características e aplicações”, TCC (Trabalho de Conclusão de Curso). Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Brasil.

Thompson, J. F., Warsi, Z. U. A., Mastin, C. W., 1985, "Numerical grid generation", Ed. North-Holland, New York, USA, 483p.

Versteeg, H. K., Malalasekera, W., 1995, "An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method", Ed. Prentice Hall, London, UK, 257p.

Warsi, Z.U.A., 1992, "Fluid dynamics: theoretical and computation approaches", Ed. CRC Press, Boca Raton, USA, 683p..

White, F. M., 1991, "Viscous fluid flow", Ed. MacGraw Hil, Inc, New York, USA, 614p.

Wolfram, S., 1999, "The mathematica book", Ed. Wolfram Research, Inc., New York, USA, 1403p.

NUMERICAL SIMULATION OF THE NATURAL GAS FLOW IN ELLIPTIC CYLINDRICAL PIPE USING THE SOFTWARE CFX-3D

Maitozambuh Araújo Cadê

UFCG/CCT/DEM/ Bolsista ANP (PRH-25)

Vinicio de Sousa Melo

UFCG/CCT/DEM/REDE COOPERATIVA DE MODELAGEM COMPUTACIONAL

Janailson Delfino de Sousa

UFCG/CCT/DEM/ Bolsista ANP (PRH-25)

Marcelo Antonio de Figueiredo Benevides Irineu

UFCG/CCT/DEM/ Bolsista Mestrado ANP (PRH-25)

Antonio Gilson Barbosa de Lima

UFCG/CCT/DEM/ Av: Aprígio Veloso, 882, Bodocongó, Caixa Postal 10069, CEP 58109-970, Campina Grande-PB, Tel/fax: (83) 310 1317 e-mail: gilson@dem.ufpb.br;

Abstract. *The natural gas consists of a mixture of inorganic gases and saturated hydrocarbons containing mainly methane, whose qualitative and quantitative composition depends on the factors involved in the production process, it collects, conditioning and drainage of the gas. Once extracted of the underground, the natural gas should be transported until the consumption zones. The transport from the production to the consumption zones is made through pipe of great diameter, denominated pipeline. That transport can be accomplished in the gaseous phase or liquefied. In the gaseous phase, the transport of the gas, it is usually accomplished to the high pressures in the environmental temperature through pipe. In this sense, the objective of this research is to present a mathematical modeling to predict the drainage of the natural gas in cylindrical pipes with elliptical cross section, considering the flow to be laminar, isothermal, incompressible, three-dimensional in steady-state with constant thermo-physical properties. The solution of the conservation equations is obtained using the finite-volume method and the UPWIND interpolation scheme. The SIMPLEC algorithm is used to treat the pressure-velocity couple. Results of the velocity and pressure distributions inside the pipe with different aspect ratios are showed and analized.*

The study of the distribution of speed and pressure of the gas inside the pipe will allow to increase the operational reliability and the useful life of the pipe net, for the prevention of leaks and to reduce the operational costs.

Keywords: natural gas, flux, simulation, finite-volume, elliptic cylinder.