

Influência da Temperatura na Incerteza da Medição da Vazão de Gás Natural Através de Placas de Orifício

William Rosendo

Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte – CEFET/RN - GETIN, Av. Sen. Salgado Filho, 1559. Tirol, Natal-RN, williamrosendo@hotmail.com

Raimundo Nonato Barbosa Felipe

Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte – CEFET/RN - GETIN, Av. Sen. Salgado Filho, 1559. Tirol, Natal-RN, nonatofelipe@cefetrn.br

Gilson Gomes de Medeiros

Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte – CEFET/RN - GETIN, Av. Sen. Salgado Filho, 1559. Tirol, Natal-RN, gilsong@cefetrn.br

Renata Carla Tavares dos Santos Felipe

Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte – CEFET/RN - GETIN, Av. Sen. Salgado Filho, 1559. Tirol, Natal-RN, rcfelipe@cefetrn.br

Nivaldo Ferreira da Silva Júnior

Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte – CEFET/RN - GETIN, Av. Sen. Salgado Filho, 1559. Tirol, Natal-RN, nivaldojr@cefetrn.br

Resumo. *No contexto atual de novas descobertas e aumento de demanda, o gás natural (GN) apresenta-se como um importante insumo energético que proporcionará ao Brasil a diversificação da sua matriz energética e o desenvolvimento sustentável do seu parque industrial. A atividade de medição de volume de GN necessita de um rigoroso controle metrológico devido ao amplo contexto em que está inserida, seja nas aplicações da indústria ou, até mesmo, próximo ao usuário comum, que utiliza o GN como combustível ou no uso domiciliar. Tanto o produtor de GN quanto o consumidor estão interessados em quantificar, medir, de maneira precisa e completa esse importante energético, pois sabe-se que, devido à sua característica de compressibilidade, as variações de condições operacionais tendem a afetar o volume medido. Em diversos campos no país, o volume de gás é calculado a partir de elementos primários como a placa de orifício e os medidores tipo turbina. Embora o Regulamento Técnico de Medição de Petróleo e Gás Natural, autorizado pela portaria conjunta ANP/INMETRO 1/2000, determine que os sistemas de medição de gás natural necessitem fazer as compensações automáticas das variações de temperatura de operação, bem como de outros parâmetros passíveis de variações, isso não é rigorosamente observado. As equações empregadas para calcular o volume possuem parâmetros que são extremamente dependentes da temperatura de operação. O presente trabalho tem por objetivo estudar essa influência, quantificar limites de variações da temperatura de operação admissíveis, verificando até que ponto o volume de gás é afetado por tais variações.*

Palavras-chave: gás natural, temperatura, incerteza.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de medição de vazão de gás natural baseados na placa de orifício como elemento primário são amplamente utilizados no Brasil, tanto nas medições fiscais quanto nas medições operacionais do gás. Acredita-se que, atualmente, cerca de 80% a 85% dos sistemas são baseados nesse elemento.

As medições fiscais e de transferência de custódia são processos críticos, que requerem o cumprimento dos termos contratuais da operação de medição executada e a devida prática da orientação técnica determinada nos regulamentos vigentes, objetivando, assim, atingir uma medição completa e atender os requisitos mínimos de incerteza de medição pré-determinados, seja no próprio contrato, ou na legislação em vigor.

No Brasil, o Regulamento Técnico de Medições de Petróleo e Gás Natural (RTM), aprovado pela Portaria Conjunta PANP/INMETRO nº 1 (2000), estabelece os requisitos mínimos que os sistemas de medição de gás natural devem possuir no sentido de garantir uma medição exata e completa.

Uma das determinações desse Regulamento refere-se à compensação da temperatura de operação e de pressão estática nos sistemas de medições fiscais, item 7.1.11, a saber: “Os sistemas de medição fiscal de gás natural devem incluir dispositivos para compensação automática das variações de pressão estática e de temperatura. A compensação deve incluir as variações do coeficiente de compressibilidade do gás decorrentes das variações de pressão e temperatura”.

O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de verificar como a temperatura está atuando no processo, analisando as variações dos parâmetros que são dependentes desta grandeza quando a mesma está variando. Para tanto, foi realizado um estudo da teoria de medição de vazão de gás através de placas de orifício, tendo por base a literatura técnica nacional e normas técnicas internacionais.

2. METODOLOGIA

Todo o estudo foi desenvolvido com base no método e na teoria da medição de vazão de gás natural descrita nas normas ISO 5167 (1991) e AGA nº 3 (1990).

As simulações numéricas foram fundamentadas nos equacionamentos fornecidos por tais documentos e, de posse dos resultados, tabelas e gráficos foram elaborados com o objetivo de se comparar a influência das variações de temperatura sobre a vazão volumétrica calculada.

A medição de vazão por placas de orifício está inserida no princípio de medição de vazão denominado de elementos geradores de pressão diferencial, no qual um elemento de restrição é posto transversalmente na tubulação com o objetivo de se produzir uma queda de pressão entre duas seções transversais do escoamento, a montante e a jusante do elemento primário, Delmée (1982). Esse elemento primário, no caso a placa de orifício, pode ser visto na Fig. (1).



Figura 1. Placa de Orifício. Disponível em: <<http://www.power-technology.com>>.

O sistema de medição de vazão utilizado para simulação neste trabalho possui características usualmente empregadas na indústria, as quais são citadas a seguir:

- Placa de orifício concêntrico de cantos vivos com tomadas de canto
- Pressão de operação: 30 bar (30×10^5 Pa)
- Diferencial de pressão: $\Delta P = 29,67$ kPa
- Temperatura de operação: 35 °C (308,15 K)
- Diâmetro do orifício à temperatura de manufatura, 20 °C: 100 mm
- Diâmetro da tubulação à temperatura de manufatura, 20 °C: 202,7 mm
- Material do tubo: aço carbono ($\lambda = 0,000\ 012\ ^\circ\text{C}^{-1}$)
- Material da placa: aço inox 316 ($\lambda = 0,000\ 0173\ ^\circ\text{C}^{-1}$)

Assim, de posse das equações utilizadas no cálculo da vazão, foram verificados os parâmetros que são dependentes da temperatura. A partir daí, um intervalo de temperatura de operação foi estabelecido, de forma aleatória, mas tomando-se por base valores reais. O intervalo de 35° a 85 °C (293,15 K a 358,15 K) com intervalos constantes de 5 °C (5 K) foi designado e todos os parâmetros dependentes da temperatura foram calculados com os valores de T pertencentes a esse intervalo.

A equação da vazão por placas de orifícios, de acordo com a ISO 5167 (1991) é dada a seguir, Eq. (1):

$$q_m = \frac{C}{\sqrt{1-b^4}} e_1 \frac{p}{4} d^2 \sqrt{2\Delta P r_1} \quad (1)$$

onde:

- | | |
|-----------------|--|
| q_m | - Vazão mássica (kg/s) |
| C | - Coeficiente de descarga |
| β | - Relação entre o diâmetro do orifício e o diâmetro da tubulação (d/D) |
| ε_1 | - Fator de expansão do fluido a montante do elemento primário |
| d | - Diâmetro do orifício à temperatura de operação (m) |
| D | - Diâmetro da tubulação à temperatura de operação (m) |
| ΔP | - Pressão diferencial medida (Pa) |
| ρ_1 | - Massa específica do fluido a montante do elemento primário nas condições de operação (kg/m³) |

O ΔP , diferencial de pressão medido, foi considerado constante e com o valor de 29,67 kPa, pois o objetivo deste trabalho, como citado antes, foi verificar apenas as variações da vazão e dos parâmetros presentes no seu cálculo a partir da variação da temperatura.

Os valores de vazão expostos no presente trabalho são os valores nas condições de referência, calculados conforme procedimento descrito na ISO 5167 (1991).

De posse dos parâmetros da equação da vazão nos pontos de temperatura determinados, foi calculada a vazão do seguinte modo, descrito na ISO 5167 (1991) e também por Martins (1998):

Para a estimativa inicial faz-se:

$$q_{m_0} = k C_\infty \quad (2)$$

$$k = \frac{1}{\sqrt{1-b^4}} e \frac{p}{4} d^2 \sqrt{2\Delta P r_1} \quad (3)$$

O algoritmo iterativo para o cálculo é:

$$\text{Re}_{D_i} = \frac{4q_{m(i-1)}}{p\eta D} \quad (4)$$

$$C_i = f(\text{Re}_{D_i}) \quad (5)$$

$$q_{m_i} = k C_i \quad (6)$$

A convergência é considerada satisfatória quando não houver diferença maior que um valor estabelecido entre dois passos sucessivos. Conforme a ISO 5167 (1991), esse valor deve ser definido pelo usuário; portanto, no presente trabalho, estabeleceu-se o valor de 0,01%.

O coeficiente de descarga é definido como sendo um fator que reflete a relação entre a vazão real (com o elemento primário) e a vazão teórica (sem o elemento primário).

O coeficiente é determinado a partir de equações empíricas, sendo dependente do número de Reynolds (Re_D) relativo ao diâmetro da tubulação, da relação de diâmetros β e do tipo de configuração das tomadas de pressão.

Para a estimativa do coeficiente de descarga, foi utilizada a equação de Stolz, Eq. (7), descrita na ISO 5167 (1991). Os limites de uso dessa equação quando se utilizam placas de orifício concêntrico de cantos vivos com tomadas nos flanges estão reproduzidos abaixo:

- $d \geq 12,5 \text{ mm}$
- $50 \text{ mm} \leq D \leq 1000 \text{ mm}$
- $0,20 \leq \beta \leq 0,75$
- $\text{Re}_D \geq 5000$ para $0,2 \leq \beta \leq 0,45$
- $\text{Re}_D \geq 10000$ para $\beta \geq 0,45 \text{ mm}$

$$C = 0,5959 + 0,0312 b^{2,1} - 0,1840 b^8 + 0,0029 b^{2,5} \left(\frac{10^6}{\text{Re}_D} \right)^{0,75} + \\ + 0,0900 L_1 b^4 (1 - b^4)^{-1} - 0,0337 L_2 b^3 \quad (7)$$

Re_D - Número de Reynolds relativo ao diâmetro da tubulação (D)

L_1 - Distância da tomada de pressão a montante da placa até a face de entrada da placa, dividida pelo diâmetro do tubo

L_2 - Distância da tomada de pressão a jusante da placa até a face de saída da placa, dividida pelo diâmetro do tubo

Quando se utilizam tomadas de canto, a equação de Stolz sofre uma simplificação, fazendo-se $L_1 = L_2 = 0$.

O número de Reynolds (Re_D), presente no cálculo do coeficiente de descarga, é dado pela Eq. (8), onde μ_1 é a viscosidade dinâmica do fluido a montante do elemento primário, (Pa.s):

$$\text{Re}_D = \frac{4q_m}{p\eta D} \quad (8)$$

A viscosidade (μ_1) e o diâmetro da tubulação (D) presentes no cálculo de Re_D dependem da temperatura de operação. As variações desses parâmetros foram determinadas a partir da variação de temperatura. Para a estimativa da viscosidade, foi utilizada a equação descrita por Martins

(1998), que fornece a estimativa da viscosidade de misturas gasosas a partir da viscosidade dos componentes da mistura.

2.1. Diâmetros da Tubulação (D) e do Orifício (d)

Os valores dos diâmetros para cada temperatura foram determinados pelas equações abaixo:

$$d = d_m [1 + \lambda (t - t_m)] \quad (9)$$

$$D = D_m [1 + \lambda (t - t_m)] \quad (10)$$

onde:

- D_m - Diâmetro da tubulação na temperatura de manufatura (m)
 d_m - Diâmetro do orifício na temperatura de manufatura (m)
 λ - Coeficiente expansão térmica do material ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
 T - Temperatura de operação ($^{\circ}\text{C}$)
 t_m - Temperatura de manufatura ($^{\circ}\text{C}$)

2.2. Massa Específica - r

A massa específica, que foi calculada para cada temperatura considerada, é um dos parâmetros mais importantes da equação da vazão devido à característica de compressibilidade do gás, conforme Rosendo et al (2003). A massa específica de referência é aquela calculada nas condições de pressão e temperatura de referência determinadas no RTM, respectivamente 0,101325 MPa e 20 $^{\circ}\text{C}$.

A equação utilizada para o cálculo da massa específica é dada a seguir:

$$r = \frac{PM}{ZR_0T} \quad (11)$$

onde:

- r - Massa específica (kg/m^3)
 P - Pressão (Pa)
 M - Massa molecular (kg/mol)
 Z - Fator de compressibilidade
 R_0 - Constante universal dos gases ($\text{Pa.m}^3/\text{mol.K}$)
 T - Temperatura absoluta (K)

O fator de compressibilidade Z foi estimado pelo método de Redlich-Kwong descrito por Martins (1998).

A massa molecular (M) do gás natural foi determinada tomando por base valores reais determinados por cromatografia de gás natural produzido em campos do Rio do Grande do Norte, cuja composição característica, em termos de frações molares, é dada a seguir: metano = 0,7651; etano = 0,1196; propano = 0,0677; i-butano = 0,0109; n-butano = 0,0174; i-pentano = 0,0038; n-pentano = 0,0037; hexanos = 0,0021; nitrogênio = 0,0098.

2.3. Fator de Expansão - ϵ

A fórmula empírica para determinação do fator de expansão ϵ do fluido de medição descrita na ISO 5167 (1991) é dada pela Eq. (12). Note-se que ϵ é determinado em função da pressão, da relação β e do expoente isoentrópico (κ) do fluido. Foram determinados valores do fator de expansão para cada ponto de temperatura pertencente ao intervalo proposto.

$$\epsilon = 1 - (0,41 + 0,35\beta^4) \frac{\Delta p}{kp_1} \quad (12)$$

- ϵ - Fator de expansão do fluido
 κ - Expoente isoentrópico do fluido
 β - Relação de diâmetros
 P_1 - Pressão de operação (Pa)
 ΔP - Pressão diferencial (Pa)

Na medição de vazão de gás natural por meio de orifícios, é necessário conhecer o valor do expoente isoentrópico, já que o fator de expansão é dependente de κ .

Para a maioria dos casos, a vazão não é sensível a erros no expoente κ . Porém, a sensibilidade de κ aumenta com o aumento da relação $\Delta P/P_1$.

Assim, para efeito da estimativa do expoente isoentrópico, é satisfatório considerar o gás em estudo como um gás perfeito ou ideal, utilizando para isso o procedimento de cálculo descrito por Martins (1998).

3. RESULTADOS

São apresentados os resultados das variações do diâmetro da tubulação, Fig. (2), do diâmetro do orifício, Fig. (3), da massa específica, Fig. (4), do fator de expansão, Fig. (5), e da vazão volumétrica, Fig. (6), todos em função da temperatura.

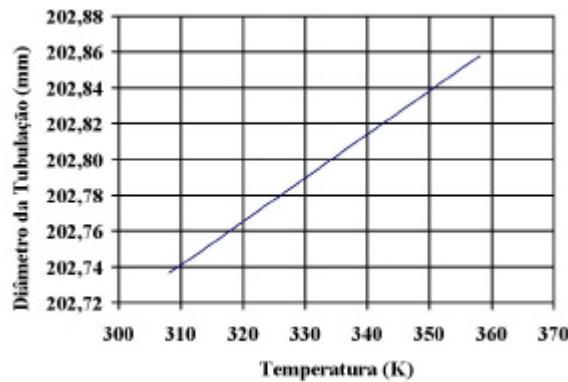


Figura 2. Variação do diâmetro da tubulação em função da temperatura.

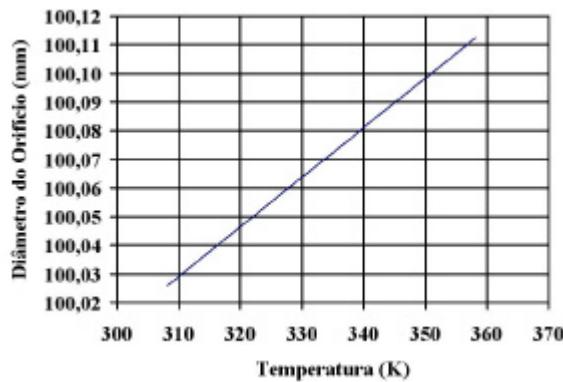


Figura 3. Variação do diâmetro do orifício em função da temperatura.

Os gráficos das Fig (2) e Fig (3) mostram que, com o aumento da temperatura, os diâmetros da tubulação e do orifício aumentam, o que já era esperado, devido à dilatação do material. No entanto, essa dilatação não é extremamente alta devido ao baixo valor do coeficiente de expansão térmica dos respectivos materiais.

A massa específica, além de ser influenciada pela temperatura, também sofre alterações devido a variações de pressão e/ou composição do gás natural. O gráfico da Fig (4) mostra que, com o aumento da temperatura, a massa específica diminuiu devido ao aumento da agitação térmica das moléculas e o consequente distanciamento das mesmas. Assim, num mesmo m^3 , a quantidade de kg de gás será menor após o aumento da temperatura, mesmo estando constantes os valores de pressão e massa molecular.

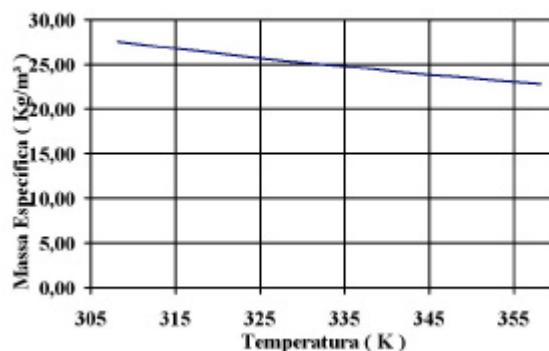


Figura 4. Variação da massa específica no intervalo de temperatura estudado.

Os resultados da variação do fator de expansão em função da temperatura evidenciaram que, com o aumento desta, o fator de expansão diminuiu, ver Fig. (5).

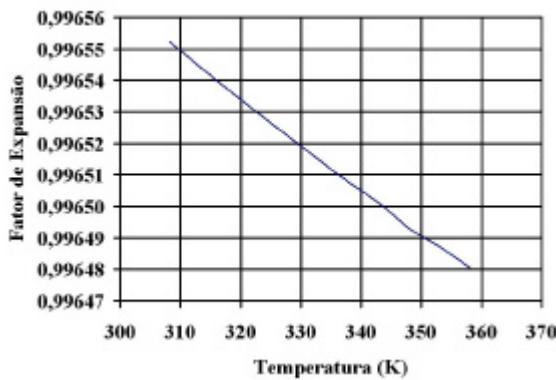


Figura 5. Variação do fator de expansão no intervalo de temperatura estudado.

A vazão volumétrica diminuiu com o aumento da temperatura. O gráfico da Fig (6) expõe a variação da vazão no intervalo de temperatura estudado.

As variações percentuais de temperatura e vazão mostram que, com uma elevação de 1,62% da temperatura, a vazão volumétrica diminuiu 1,03%, enquanto que elevações de 8,11% e 16,23% na temperatura provocaram diminuições da vazão na ordem de 4,75% e 8,72% respectivamente.

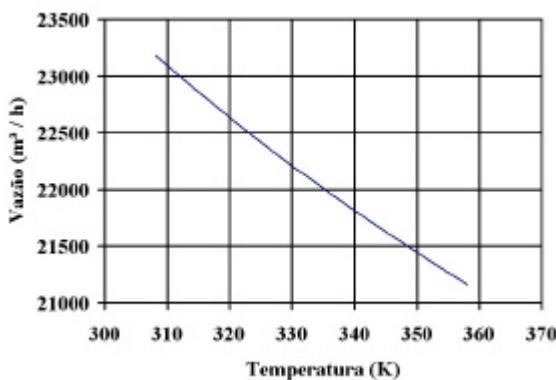


Figura 6. Gráfico da vazão volumétrica no intervalo de temperatura estudado.

4. CONCLUSÃO

Neste artigo, foi mostrada a variação dos parâmetros presentes na equação da vazão, bem como as variações da vazão volumétrica calculada no intervalo de temperatura proposto.

Verificou-se que uma variação de 16,23%, de 308,15 K a 358,14 K (35 °C a 85°C), na temperatura de operação provocou uma diminuição em torno de 8,72%, 23182,009 m³/h a 21161,20 m³/h, na vazão volumétrica calculada.

Basendo-se nos cálculos apresentados e considerando os gráficos e valores expostos neste estudo, verifica-se que a compensação da temperatura de operação nos cálculos de volume de gás natural é necessária, uma vez que, sem este procedimento os níveis de incerteza do sistema de medição por placa de orifício estariam passíveis de sofrerem elevações.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado como parte do projeto de pesquisa “Incerteza na Medição de Petróleo e Gás Natural”, participante da Rede de Instrumentação e Controle. Os autores agradecem à Finep, pelo apoio financeiro, à ANP, pela disponibilização de dados, e ao CNPq, pela bolsa concedida ao estudante W. Rosendo, o que foi essencial à realização dessa investigação.

6. REFERÊNCIAS

- AGA nº 3, 1990, "Orifice Metering of Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Fluids – Part 1: General Equations and Uncertainty Guidelines", American Gas Association, USA.
- Delmée, G.J., 1982, "Manual de Medição de Vazão", Ed. Edgard Blücher Ltda., São Paulo, Brasil.
- Daniel Measurement and Control, 1997, "Fundamentals of Orifice Meter Measurement", Houston, Texas, USA.
- ISO 5167, 1991, "Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices – Part 1: Orifice plates, nozzles and Venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full", International Organization for Standardization, Genève, Switzerland.
- Martins, N., 1998, "Manual de Medição de Vazão: através de placas de orifício, bocais e venturis", Ed. Interciência Ltda., Rio de Janeiro, Brasil.
- PANP/INMETRO 1/2000, "Regulamento Técnico de Medição de Petróleo e Gás Natural", Agência Nacional do Petróleo/Instituto Nacional de Metrologia Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO, Brasil.
- Rosendo, W., Medeiros, G.G., Felipe, R.N.B., Felipe, R.C.T.S. e Júnior, N.F.S., 2003, "Influência dos Parâmetros da Composição do Gás Natural na Incerteza da Medição do Volume Produzido", Artigo publicado nos anais do III Congresso Brasileiro de Metrologia, Recife, PE, Brasil.

Influence of the Temperature in the Uncertainty of the Measurement of the Natural Gas Outflow Through Plates of Orifice

William Rosendo

Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte – CEFET/RN - GETIN, Av. Sen. Salgado Filho, 1559. Tirol, Natal-RN, wiliamrosendo@hotmail.com

Raimundo Nonato Barbosa Felipe

Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte – CEFET/RN - GETIN, Av. Sen. Salgado Filho, 1559. Tirol, Natal-RN, nonatofelipe@cefetrn.br

Gilson Gomes de Medeiros

Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte – CEFET/RN - GETIN, Av. Sen. Salgado Filho, 1559. Tirol, Natal-RN, gilsong@cefetrn.br

Renata Carla Tavares dos Santos Felipe

Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte – CEFET/RN - GETIN, Av. Sen. Salgado Filho, 1559. Tirol, Natal-RN, rcfelipe@cefetrn.br

Nivaldo Ferreira da Silva Júnior

Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte – CEFET/RN - GETIN, Av. Sen. Salgado Filho, 1559. Tirol, Natal-RN, nivaldojr@cefetrn.br

Abstract. In the current context of new discoveries and demand increasing, the natural gas (NG) becomes an important energy input that it will provide the diversification of the national energy sources and the maintainable development of the Brazilian industrial park. The activity of volume measurement of NG needs a rigorous metrological control due to its important applications as much in the industry as in the home use. So much the NG producing companies as the consumer are interested in quantifying and measuring in an accurate and complete way that important source of energy. In this sense, one of the main troubles is that, due to the compressibility characteristic of NG, the variations of operational conditions tend to affect the measured volume. In Brazil, the volume of natural gas is commonly calculated starting from primary elements as the orifice plate and the turbine meters. Although the Technical Regulation of Measurement of Petroleum and

Natural Gas, authorized for the governmental decree ANP/INMETRO 1/2000, determines that the systems of NG measurement have to do automatic compensations of the changing of operation temperature, as well as of other parameters susceptible to variations, that is not observed strictly. The equations that are utilized to calculate the volumes of natural gas usually include parameters that are extremely dependents of the operation temperature. The present work intends to study that influence and to quantify limits of acceptable variations of the operation temperature, verifying to what extent the gas volumes are affected by such variations.

Keywords. *natural gas, temperature, uncertainty.*