

CALIBRAÇÃO DE MEDIDORES DE VAZÃO DE BIOGÁS COM FINALIDADE À VENDA DE CRÉDITOS DE CARBONO

*Gilder Nader, Paulo Thiago Fracasso, Elcimar da Silva Nóbrega, Rui Gomez,
Marcio Nunes, Antônio Luiz Pacífico e Nilson Massami Taira*

Centro de Metrologia de Fluidos
Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo,
São Paulo, Brasil, gnader@ipt.br / cmf@ipt.br

Resumo: Este trabalho tem como finalidade descrever a metodologia empregada pelo Centro de Metrologia de Fluidos (CMF) do IPT para calibração em laboratório e *in situ* de medidores de vazão de biogás utilizados, principalmente, em empresas que comercializam créditos de carbono; embora a metodologia possa ser empregada para qualquer tipo de medidor de vazão de gás.

Palavras chave: vazão, biogás, pitometria, crédito de carbono.

1. INTRODUÇÃO

Atividades antropogênicas produziram, a partir da metade do século XVIII, aumento na concentração atmosférica de dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), Óxido Nitroso (N_2O), entre outros. Este aumento nas concentrações é proveniente, principalmente do uso de combustíveis fósseis e da agricultura. Atualmente, a concentração atmosférica de CO_2 continua aumentando, enquanto as concentrações de CH_4 e N_2O vêm diminuindo a partir do final do século XX [1].

Para um controle sobre as atividades antropogênicas, foi criado, em 1997, o protocolo de Quioto [2] e a venda de créditos de carbono como um mecanismo destinado ao controle da emissão de gases do efeito estufa na atmosfera. Os créditos de carbono são estabelecidos a partir do potencial de aquecimento global, e para cada tonelada do gás, são atribuídos os seguintes créditos: $\text{CO}_2 = 1$; $\text{CH}_4 = 21$; $\text{N}_2\text{O} = 310$, entre outros. Por esse motivo, empresas que comercializam créditos de carbono necessitam de medição confiável da vazão e composição do gás.

Os medidores de vazão do biogás devem ser calibrados periodicamente, e possuir o menor erro possível, para que não haja prejuízo para nenhuma das partes envolvidas no processo de compra e venda dos créditos. No Brasil as empresas, aterros sanitários etc., normalmente utilizam medidores de vazão do tipo mássico-térmico, ou por diferencial de pressão em suas linhas. Em quaisquer dos casos os instrumentos são normalizados [3-4].

Atualmente, no Brasil há duas possibilidades de calibração desses instrumentos, em laboratório acreditado a

organismos internacionais, ou calibrações *in situ* com padrões rastreáveis à cadeia metrológica, que é o caso do Centro de Metrologia de Fluidos do IPT, que atua há mais de 20 anos na área de medição de vazão, desenvolvendo metodologia e instrumentação para calibrações confiáveis e com baixa incerteza.

Na Seção 2 são descritas as técnicas empregadas em laboratório e *in situ*, e na Seção 3 são apresentados os resultados de duas calibrações *in situ*.

2. TÉCNICAS DE CALIBRAÇÃO

2.1. Calibrações no laboratório

Laboratórios que realizam essas calibrações devem ser acreditados à Rede Brasileira de Calibrações (RBC), ou reconhecidos segundo o *International Laboratory Accreditation Cooperation* (ILAC), como é o caso do CMF/IPT, que possui instalação climatizada, utilizando como padrões medidores de vazão do tipo turbina, em linhas de até 12 pol e com vazão máxima de 3 250 m^3/h , e incerteza expandida da calibração que pode chegar a 0,17% da melhor capacidade. Toda a aquisição de dados é realizada por meio de sistema automatizado utilizando tecnologia digital de comunicação *fieldbus* ISP.

As desvantagens na calibração em laboratório estão relacionadas à faixa de vazão de calibração e diâmetro máximo de tubulação que o laboratório pode operar, que em alguns casos poderá estar muito abaixo das características de operação do sistema nas suas instalações. Além desses dois fatores, há ainda uma impossibilidade de reproduzir a composição média do biogás de cada instalação, e também o perfil de velocidade do escoamento, o que afeta o resultados da vazão indicada.

Quando há algum problema que inviabilize a calibração em laboratório, então esta deve ser realizada *in situ*, como descrito no próximo item.

2.2. Calibrações *in situ* utilizando a técnica de pitometria

As calibrações *in situ* possuem a vantagem de serem realizadas, exatamente, nas condições de operação, que são:

temperatura, pressão manométrica e atmosférica, e massa específica do biogás. Além disso, muitas vezes o medidor de vazão é instalado na linha em trecho reto inferior aos solicitados pelas normas. Dessa forma, uma calibração *in situ* permite que o medidor seja ajustado para as condições de operação, minimizando o erro da indicação do instrumento.

As desvantagens das calibrações *in situ* estão relacionadas principalmente com a dificuldade de encontrar na linha de biogás comprimentos de trechos a montante e a jusante, da instrumentação padrão de calibração, que atendam às recomendações da norma BSI 1042 [3], e por isso a incerteza da calibração normalmente estará entre 1 % e 3 %.

A técnica de calibração *in situ*, empregada pelo CMF/IPT, é a de mapeamento de velocidade do escoamento, utilizando tubo de Pitot Cole (ver Fig. 1) e o método *log-linear* para o mapeamento pitométrico em 10 pontos ao longo de cada diâmetro ortogonal, que são os *traverses* vertical e horizontal, seguindo as instruções da norma BSI 1042 [3]. Em cada *traverse* é realizado um mapeamento de velocidades na subida e um na descida.

Na Fig.1 são apresentadas as posições das medições e do eixo de referência y que inicia no ponto da tubulação diametralmente oposto ao *tap*.

A partir do mapeamento de velocidades é obtida a vazão volumétrica (Q), calculada em função da velocidade média do escoamento na seção de medição (\bar{u}), em m/s, e da área interna (S) da seção transversal do local de medição, em m^2 :

$$Q = \bar{u} \cdot S \quad (1)$$

para:

$$\bar{u} = C \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_i}{\rho}}}{n} \quad (2)$$

onde:

C : coeficiente de calibração do tubo de Pitot Cole, obtido por calibrações em laboratório;

$\sqrt{\Delta P_i}$: raiz quadrada do diferencial de pressão medido em cada ponto do mapeamento de velocidade;

ρ : massa específica do gás em kg/m^3 nas condições de operação, determinada de acordo com a AGA8 [4].

No entanto, de acordo com normalização da ONU, a vazão de biogás para venda de crédito de carbono deve ser medida nas condições de referência, 0 °C e 101,325 kPa. Dessa forma, a vazão volumétrica obtida com tubo de Pitot Cole pode ser transformada em vazão mássica (kg/s) de acordo com:

$$Q_m = Q \cdot \rho \quad (3)$$

e para as condições de referência (m^3/s) por:

$$Q_n = \frac{Q_m}{\rho_n} \quad (4)$$

onde:

ρ_n : massa específica da composição do fluido em kg/m^3 nas condições de referência, especificada no manual do fabricante do medidor, ou calculada de acordo com recomendações da AGA-8 [4].

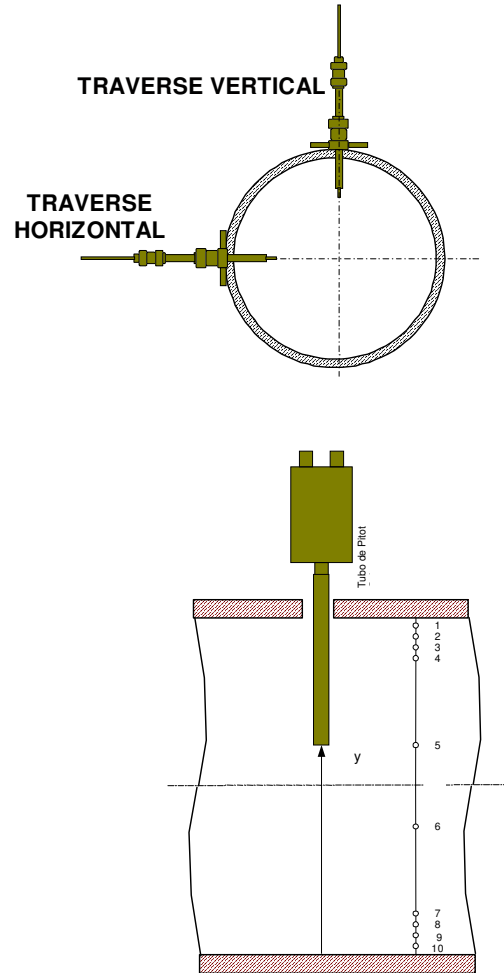


Fig. 1. (a) Mapeamento do perfil de velocidade com tubo de Pitot Cole nos *traverses* vertical e horizontal; (b) Posições de medição do tubo de Pitot Cole

2.2.1. Instrumentação para aquisição *in situ*

Na Fig. 2 está representado um fluxograma de instrumentação do sistema de calibração *in situ* de medidores de vazão de biogás, que é composto por dois elementos de medição de vazão, o medidor padrão (FE01) e o medidor em teste (FE02), um transdutor de pressão diferencial (FIT01) e um manométrico (PIT01), um transdutor de pressão absoluta, não inserido no fluxograma e um transdutor de temperatura (TE01 + TIT01).

Na calibração do medidor de vazão, seja um mássico-térmico, um tubo multifuros, uma placa de orifício ou outro tipo, esquematizado na Fig. 2 por (FE02) + (FIT02), são determinados os erros, desvios e incerteza da calibração. O padrão de calibração de vazão é o tubo de Pitot Cole (FE01), o qual pode estar a montante ou a jusante do medidor a ser calibrado, dependendo de avaliação prévia da linha por

equipe técnica especializada em medição de vazão, e esta é baseada na norma BSI 1042 [3]. Esta avaliação leva em conta os trechos retos disponíveis e qualquer tipo de singularidade, como por exemplo, amostradores de gás, medidores de vazão, sensores de temperatura, *by-pass* etc.

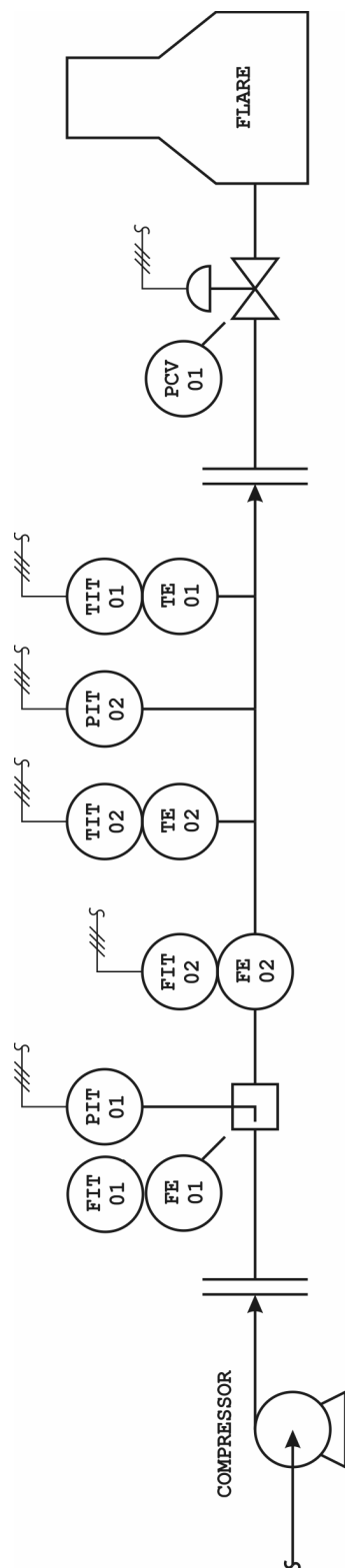


Fig.2. Fluxograma de instrumentação

As aquisições dos valores de pressão manométrica (PIT01), temperatura (TE01 + TIT01) e pressão atmosférica são utilizadas em conjunto com a composição do gás para

determinação de sua massa específica nas condições reais e nas condições de referência, de acordo AGA8 [4].

Como complemento à calibração, são monitorados valores indicados nos equipamentos da empresa, instalados na linha, como por exemplo, transdutor de pressão manométrica (PIT02) e temperatura (TE02 + TIT02). Essa monitoração tem o intuito de determinar se erros na indicação da vazão são ocasionados também por indicações incorretas desses outros parâmetros.

Para garantir uma calibração em campo com incerteza abaixo de 3%, todo o processo de aquisição de dados é automatizado, utilizando o protocolo de comunicação *Hart*, interligando a instrumentação de campo a um computador de armazenamento e processamento dos dados adquiridos dos transdutores. Por meio da aquisição automatizada a calibração se torna mais confiável, pois o sinal é digitalizado diretamente dos transdutores, obtendo-se dessa forma maior exatidão nas medições, e também menor incerteza, porque podem ser alterados os tempos de aquisição para que haja um volume maior de amostras adquiridas.

No esquema mostrado na Fig. 2 há também um compressor, uma válvula (PCV01), e o flare, que é uma das configurações típicas de linhas de biogás.

2.2.2. Procedimento para Cálculo de Incerteza

O cálculo da incerteza expandida [6] leva em consideração as incertezas do tipo *a* e *b* [6], baseadas em: incerteza da calibração em laboratório dos transdutores de pressão e temperatura, incerteza da calibração em laboratório do tubo de Pitot Cole, incerteza na determinação da massa específica do biogás. Além dessas incertezas também é considerado no cálculo final da incerteza expandida de medição de vazão o perfil de velocidade obtido, e a repetitividade.

Em cada *traverse* o mapeamento de velocidade é realizado sempre na subida e na descida, para que assim possa ser determinada a repetitividade. Caso não haja repetitividade na subida e descida no mapeamento de velocidades, são realizadas novas aquisições para comprovar o fenômeno, ou verificar se houve algum erro em alguma das medições.

Idealmente as calibrações em campo devem ser realizadas em pelo menos 3 vazões distintas, como por exemplo, 25%, 50% e 100% da capacidade máxima de operação. No entanto, muitas vezes a empresa interessada na calibração do medidor *in situ* não possui a capacidade da variação da vazão. Ou, muitas vezes consegue a variação na faixa de 70% até 100% da vazão máxima. Dessa forma, as calibrações são realizadas nas condições encontradas no local.

3. RESULTADOS

Os resultados das calibrações, apresentados a seguir, refletem um desgaste natural dos medidores, devido ao tempo de operação na linha (medidor mássico-térmico por inserção), a necessidade de recalibração periódica desses

dispositivos, para que possam ser realizados os devidos ajustes. E também a determinação do coeficiente de calibração de tubos multifuros ou dos parâmetros de programação da variável primária desses dispositivos, quando esta é a vazão.

Nesse trabalho são apresentadas 3 calibrações realizadas *in situ*, que foram de um medidor de vazão mássico-térmico por inserção e de dois tubos multifuros. Todos os medidores de vazão indicavam no FIT02 a vazão nas condições de referência, que de acordo com informações contidas nos manuais dos fabricantes eram: pressão atmosférica 101,325 kPa e temperatura 0 °C. As calibrações foram realizadas nas condições reais (*actual condiction*s) e as vazões foram corrigidas para a condição de referência de acordo com as Eq. (3) e (4).

3.1. Calibração do medidor mássico-térmico por inserção

O medidor de vazão mássico-térmico por inserção estava instalado em uma linha de 500 mm de diâmetro nominal. Nesta calibração a estação pitométrica foi instalada a montante do medidor a ser calibrado. O trecho reto a montante da estação pitométrica era de 5 diâmetros, porém, de acordo com BSI 1042 [3], o trecho reto mínimo deve ser de 20 diâmetros, por esse motivo a incerteza expandida (U) da calibração foi de 2,5 %. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela. 1.

Neste caso, assim como nas duas calibrações seguintes, as linhas não possuíam trechos retos adequados. Portanto, as estações pitométricas não foram instaladas nas condições ideais, para as quais o escoamento estaria perfeitamente desenvolvido. Mesmo assim, nota-se que uma incerteza expandida de 2,5 % é um valor bom e comum, considerando calibrações *in situ* [3].

Esta calibração foi realizada para uma única vazão, pois a planta não possuía inversor de frequência ou outro sistema de controle de vazão. Pode ser notado pela Fig. 3 que a calibração foi realizada nos *traverses* horizontal e vertical, com mapeamento de velocidade na subida e descida. Para um mesmo *traverse* o mapeamento se mostra repetitivo.

As curvas de mapeamento são apresentados na forma adimensional para as relações V/V_c , que é a razão da velocidade obtida em um ponto (V_i) pela velocidade central (V_c). E na forma adimensional para Y/Y_c , que é a razão da posição do mapeamento (Y_i) pela posição central (Y_c). Todos os gráficos de mapeamento apresentados neste trabalho estão na forma adimensional.

Tabela 1. Resultados da calibração do medidor mássico-térmico

Q.v.c.	U		Q.v.c. ref	Q	s	erro da indicação
m ³ /min	m ³ /min	%	m ³ /min	Nm ³ /min	Nm ³ /min	%
158	4	2,5	124	119	2	- 4

onde **Q.v.c** é a vazão verdadeira convencional nas condições reais; **Q.v.c ref** é a vazão verdadeira convencional na condição de referência, **Q** é a vazão indicada nas condições de referência, e **s** é o desvio padrão da vazão indicada.

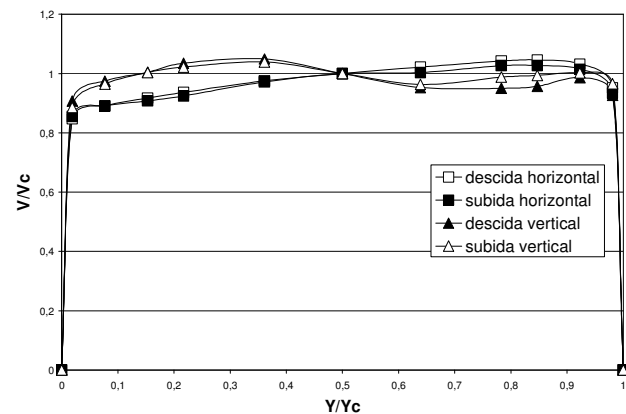


Fig.3. Curvas do mapeamento de velocidades na estação pitométrica. São mostradas as curvas de subida e descida nos *traverses* horizontal e vertical

Por meio da Fig. 3 nota-se que o perfil de velocidades é assimétrico, e assim, ele é um dos responsáveis pela incerteza expandida de 2,5 % na calibração.

Nota-se também, que o erro de indicação do medidor de vazão é - 4 %, que é superior à incerteza da calibração. Esse erro ocorre por dois motivos básicos: o medidor está instalado 10 diâmetros a jusante de um cotovelo, quando a recomendação do fabricante é de pelo menos 15 diâmetros. Por esse motivo, o perfil não estava simétrico, afetando no valor indicado pelo medidor, e o erro aumenta devido a um pequeno desvio no posicionamento do mássico-térmico por inserção.

3.2. Calibração dos medidores tubo multifuros

Foram calibrados 2 medidores de vazão tipo tubo multifuros. Estes medidores devem ser instalados em linhas secas, portanto, não devem ser instalados em linhas de biogás de aterros sanitários, pois normalmente esse gás é muito úmido. Mas podem ser instalados em linhas secas de N₂O.

Estas calibrações foram realizadas com dois objetivos: verificar se a programação do primário estava correta e determinar o coeficiente de calibração do tubo multifuros.

Os resultados apresentados na Tabela 2 e na Fig. 4 são da calibração do tubo multifuros 1 contra a indicação do TIF02 em vazão. Esta linha possui 750 mm de diâmetro nominal. Nesta calibração a estação pitométrica foi montada a jusante tubo multifuros. A incerteza expandida neste caso foi de 1,6 %.

Tabela 2. Resultados da calibração do tubo multifuros 1

Q.v.c.	U		Q.v.c. ref	Q	s	erro da indicação
m ³ /s	m ³ /s	%	m ³ /s	Nm ³ /s	Nm ³ /s	%
13,36	0,22	1,6	9,91	9,44	0,03	-4,7

Esta calibração foi realizada para uma única vazão, por não haver sistema de controle da mesma. Nota-se pela Fig. 4 que foram realizados mapeamentos de velocidade na subida

e descida nos *traverses* horizontal e vertical. Os perfis de velocidade são repetitivos e assimétricos, devido ao fato da singularidade a montante da estação pitométrica ser um tubo multifuros instalado 3 diâmetros, devido à dificuldade técnica de se instalar a estação pitométrica em trecho reto maior. Apesar disso, a incerteza da calibração foi de 1,6 %. Porém, o erro da indicação foi de -4,7 %. Esse erro deve-se ao uso incorreto do coeficiente de calibração do tubo multifuros na programação do TIF02. O fabricante especificou que o tubo multifuros possui $C = 0,69$. Porém, tipicamente este tubo multifuros possui o coeficiente de calibração entre 0,72 e 0,75, conforme mostrado nos resultados da próxima calibração.

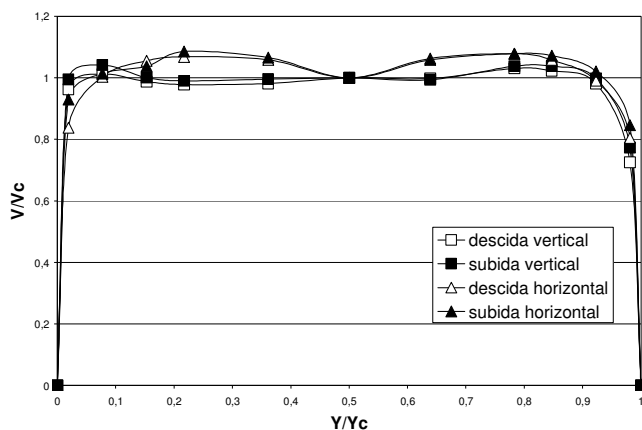


Fig.4. Curvas do mapeamento de velocidades na estação pitométrica. São mostradas as curvas de subida e descida nos *traverses* horizontal e vertical

Na Tabela 3 são mostrados os resultados da calibração do tubo multifuros 2, em uma linha de diâmetro nominal 500 mm. O objetivo foi determinar o coeficiente de calibração (C) do tubo multifuros. Dessa forma, foram adquiridos os dados de diferencial de pressão médio registrado na estação pitométrica ($\Delta P_{v.c.}$) e também no tubo multifuros (ΔP). Como ambas as medições de diferencial de pressão foram realizadas no mesmo trecho de tubo, com o mesmo diâmetro, o coeficiente e calibração do tubo multifuros foi calculado de acordo com:

$$C = C_{cole} \sqrt{\frac{\Delta P_{cole}}{\Delta P_{ann}}} \quad (5)$$

onde:

C_{cole} : é o coeficiente de calibração do tubo de Pitot Cole usado na calibração ($C_{cole} = 0,869$), que é obtido em calibração em laboratório; ΔP_{cole} : é o diferencial de pressão médio registrado na estação pitométrica e ΔP_{ann} é o diferencial de pressão médio registrado no tubo multifuros.

O coeficiente de calibração médio do tubo multifuros foi 0,742 com incerteza expandida de 0,010.

Para realização dessa calibração, a estação pitométrica foi montada a jusante do tubo multifuros. Por esse motivo, o perfil de velocidades é assimétrico, e a incerteza da medição de vazão foi de 2,1 % e 2,4 % para duas vazões de operação,

ver Tabela 3. Na Fig.5 são mostradas as curvas de mapeamento de velocidade. Nota-se que neste caso houve uma boa repetitividade em todas as subidas e descidas; o perfil de velocidades foi o mesmo para as duas vazões de calibração; e o perfil horizontal e vertical são muito similares.

Tabela 3. Resultados da calibração do tubo multifuros 2

Vazão de operação	Q.v.c.	U	ΔP.v.c.	ΔP	s	Coeficiente de calibração C com incerteza expandida
%	m³/s	m³/s	%	Pa	Pa	Pa
80	5,20	0,11	2,1	439,89	604,55	3,10
100	6,03	0,14	2,4	543,95	744,23	2,52

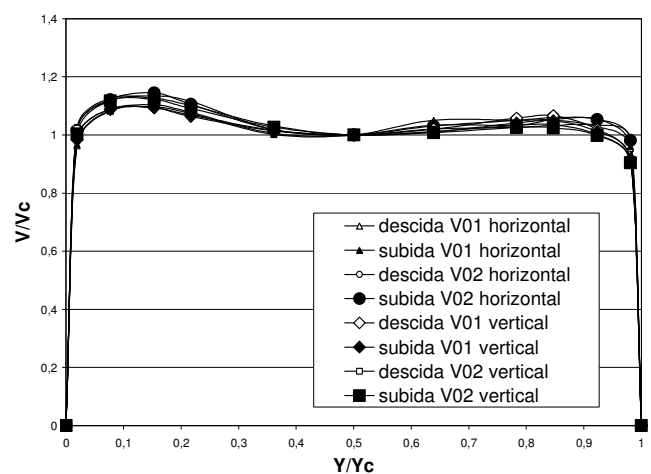


Fig.5. Curvas do mapeamento de velocidades na estação pitométrica para duas vazões V01 e V02. São mostradas as curvas de subida e descida nos *traverses* horizontal e vertical

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram descritos os métodos em laboratório e *in situ* de calibração de medidores de vazão de biogás. Quando for possível calibrações em laboratório, a incerteza expandida mínima pode chegar a 0,17 %. Quando as calibrações necessitam ser realizadas *in situ*, a incerteza expandida tipicamente fica entre 1 % e 3 %.

Foram mostrados 3 resultados de calibração em campo. A calibração do medidor de vazão mássico-térmico por inserção apresentou uma incerteza da calibração de 2,5 % devido ao comprimento de trecho reto a montante da estação pitométrica (padrão da calibração) ser insuficiente. E, como resultado principal foi verificado que o medidor calibrado apresentava um erro de -4 % devido também a estar instalado em trecho reto inferior ao recomendando pelo fabricante, e a erro no posicionamento do medidor.

A calibração dos dois tubos multifuros indicou erro na programação da variável primária (cálculo da vazão), devido ao uso do fator de calibração (C) fornecido pelo fabricante. Tipicamente o fabricante fornece um valor de C de 0,68 ou 0,69. No entanto, quando calibrados os tubos multifuros

com comprimentos inferiores a 750 mm apresentam valores de C na faixa de 0,700 até 0,750.

As incertezas expandidas das 3 calibrações ficaram entre 1,6 % e 2,5 % devido aos perfis obtidos serem assimétricos por não haver trecho reto suficiente para o desenvolvimento do escoamento.

Estes resultados mostram a necessidade de calibração dos medidores de vazão, seja em laboratório ou *in situ*.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio técnico de Mário Trevisan da Costa e Josiel de Andrade Alves.

REFERÊNCIAS

- [1] Climate Change 2007: The Physical Science Basis – Intergovernmental Panel on Climate Change – Summary for Policymakers (http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/Report/AR4WG1_Print_SPM.pdf), acessado em 15/05/2008.
- [2] Protocolo de Quioto – editado e traduzido pelo Ministério de Ciência e Tecnologia (<http://www.carbonobrasil.com/images/documentos/protocolo.pdf>) acessado em 15/05/2008.
- [3] BSI 1042 – Measurement of fluid flow in closed conduits.
- [4] AMERICAN GAS ASSOCIATION – 1994 - Transmission Measurement Committee Report No. 8 Compressibility Factors of Natural Gas and other Related Hydrocarbon Gases. AGA Arlington, Virginia.
- [5] ISO 14511 – Measurement of fluid flow in closed conduits – Thermal mass flowmeters.
- [6] *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição, 3ª Edição, ABNT e INMETRO, 2003.*