

Calibração de Fluxômetros tipo Placa de Orifício

Christian A. Vieira
Laboratório Associado de Combustão e Propulsão - INPE
Rod. Pres. Dutra, km 40 - s/nº, Cachoeira Paulista, SP
Brasil

Daltro G. Pinatti
Instituto de Física "Gleb Wataghin"
Cidade Universitária Zeferino Vaz, Campinas, SP
Brasil

João A. de Carvalho Jr.
Laboratório Associado de Combustão e Propulsão - INPE
Rod. Pres. Dutra, km 40 - s/nº, Cachoeira Paulista, SP
Brasil

Abstract

This work presents the design and calibration techniques used with six orifice plates: four for small flow rates (up to 120g/s of air, or 335Nm³/h) and two for large flow rates (larger than 500g/s of air, or 1400Nm³/h). Experimental data are obtained for massic flow rates of air in the range 2.45g/s to 300g/s (6.85 to 840Nm³/h). For higher flow rates, modifications in the techniques used are suggested. Experimental errors smaller than 0.5% were achieved.

1 Introdução

Está em desenvolvimento no CEMAR (Centro de Engenharia de Materiais), em convênio com o INPE/LCP (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - Laboratório Associado de Combustão e Propulsão) uma planta piloto de 5MWt de geração de energia elétrica por MHD [1]. Parte do projeto é um combustor que opera a 6 atm e 2900K, tendo como combustível a celulignina (sólido pulverizado) proveniente da hidrólise ácida da madeira ou do bagaço da cana-de-açúcar. Para atingir tais temperaturas, utiliza-se ar enriquecido (40% de O₂ e 60% de N₂ em base volumétrica) e combustão estequiométrica. Na fase



Anais do 2.^o
Simpósio Brasileiro de
Medição de Vazão
20-23/03/95 - IPT-SP

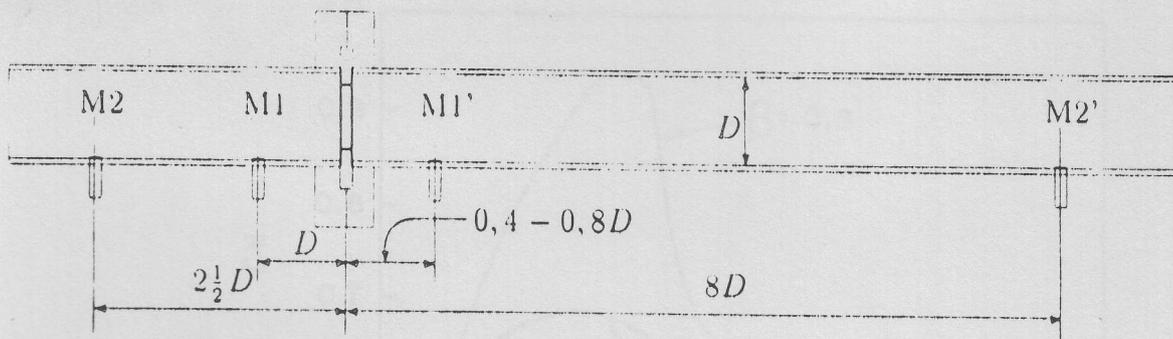


Figure 1: Esquema de um Fluxômetro tipo Placa de Orifício

inicial de testes intermitentes, é usado suprimento de N_2 e O_2 líquidos, evitando-se o uso de um turbo compressor de grande porte. O controle do combustor exige o monitoramento do fluxo de gases: O_2 e N_2 para combustor operando a plena carga, o que exige fluxômetros de grande porte (vazão máxima superior a $500g/s$), *GLP* ou gás natural para pré-aquecimento e chama piloto, N_2 e O_2 para combustão do *GLP* durante pré-aquecimento e N_2 para carregamento do sólido (celulignina), exigindo quatro fluxômetros de pequeno porte (vazão mássica inferior a $100g/s$) [2].

Optou-se pelo uso de fluxômetros tipo placa de orifício devido à precisão obtida e facilidade de construção, apesar da grande perda de carga inerente ao sistema. Cálculos para projeto foram baseados nas equações apresentadas por Doebelin [3].

Este trabalho apresenta detalhes de projeto dos fluxômetros e a técnica de calibração utilizada. Dados experimentais para vazões mássicas de até $120g/s$ de ar em fluxômetros de pequeno porte e de até $300g/s$ de ar em fluxômetros de grande porte, com erros variando entre 0,4% e 2,5% são obtidos. As curvas de calibração são comparadas com as curvas teóricas. São feitas sugestões de modificação da técnica de calibração para vazões superiores aos máximos valores obtidos.

2 Projeto, Montagem e Técnica

O esquema típico de um fluxômetro tipo placa de orifício é apresentado na Figura 1. Próximo ao orifício a queda de pressão é mais acentuada devido, principalmente, à aceleração do fluido; esta queda de pressão é medida pela diferença de alturas de uma coluna d'água, de um tubo em U conectando o par de aberturas internas (próximas à placa) no tubo principal ($M1$ e $M1'$). Efeitos dissipativos, acentuados pela presença da placa de orifício, causam uma perda permanente de pressão no sistema; esta perda é medida com o auxílio de um segundo tubo em U conectando o par de aberturas externo no tubo principal ($M2$ e $M2'$).

A vazão mássica, W , neste tipo de fluxômetro é determinada em função da diferença de pressão entre os pontos $M1$ e $M1'$. De acordo com [3], esta vazão é dada por:

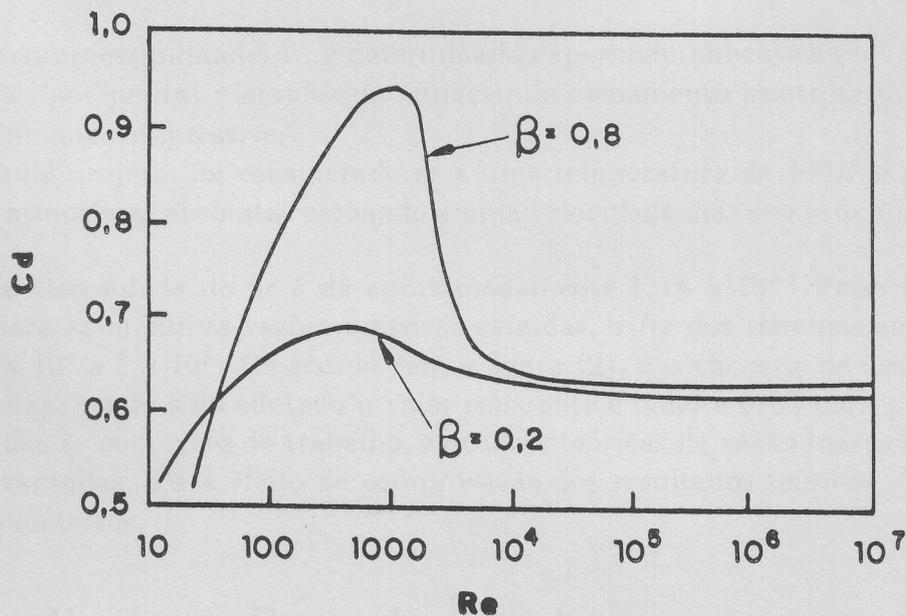


Figure 2: Coeficiente de Descarga

Fonte [3]

$$W = Y C_d A_2 \left(\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2} \right)^{-1} \sqrt{\frac{2g(p_1 - p_2)}{v_1}} \quad (1)$$

onde W é dado em kg/s , A_1 é a área do tubo (m^2), A_2 a área do orifício (m^2), v_1 o volume específico do fluido (m^3/kg) avaliado segundo as condições na seção transversal do tubo em $M1$, $(p_1 - p_2)$ a diferença de pressão entre os pontos $M1$ e $M1'$ (Pa), g é o fator de conversão de unidades (1 no SI e 32,174 no sistema inglês), C_d é o coeficiente de descarga, apresentado na Figura 2 em função do número de Reynolds (Re) no orifício para dois valores de β (razão entre o diâmetro do orifício e o diâmetro do tubo) e Y é o fator de compressibilidade que, para este tipo de fluxômetros ou vena-contracta, é dado por [3]:

$$Y = 1 - (0,41 + 0,35\beta^4) \frac{p_1 - p_2}{p_1} \frac{1}{\gamma} \quad (2)$$

sendo γ a razão entre os calores específicos do gás (1,4 para moléculas diatômicas).

O coeficiente de descarga é definido como a razão entre a taxa de escoamento volumétrico medida e a taxa de escoamento volumétrico teórica. A taxa de escoamento volumétrica teórica é obtida considerando-se escoamento unidimensional incompressível e invíscido e partindo-se do conhecimento das áreas efetivas de escoamento máxima e mínima. O coeficiente de descarga, portanto, ajusta os resultados teóricos aos resultados práticos, em que se conhecem os diâmetros do tubo e do orifício, e se mede a queda de pressão próxima à placa.

O fator de compressibilidade, Y , é determinado experimentalmente e tem a função de inserir correções por perdas e desvios da situação de escoamento isentrópico, quando se trabalha com fluidos compressíveis.

Para efeito de projeto, foi considerado ar a uma temperatura de $300K$ e pressões de 6,0, 6,5 e 7,0 atmosferas absolutas escoando a uma velocidade máxima próxima de $50m/s$ no orifício.

A $300K$, a viscosidade do ar é de aproximadamente $1,18 \times 10^{-4}$ Poise [4]. Nessas condições, e para as máximas vazões mássicas exigidas, o Re dos sistemas encontram-se na faixa de 4×10^4 a 2×10^5 . De acordo com a figura (2), o coeficiente de descarga varia pouco nessa faixa, tendo sido adotado o valor constante e igual a 0,63 para projeto.

Estabelecidas as condições de trabalho, as curvas teóricas de vazão mássica nos fluxômetros são levantadas. Para efeito de comprovação dos resultados teóricos, é necessário calibrar os fluxômetros.

3 Procedimento Experimental

Os seis fluxômetros projetados foram construídos nas dependências das duas instituições (LCP/INPE e CEMAR/FAENQUIL) e calibrados nas dependências desta última. O diâmetro do tubo principal dos quatro fluxômetros de pequeno porte é de $21,4mm$; para os fluxômetros de grande porte tem-se um tubo com diâmetro de $68mm$ e outro de $41mm$.

A técnica de calibração consiste em: a) fazer o gás proveniente de um reservatório pressurizado e de volume conhecido escoar através do fluxômetro, com vazão controlada por uma válvula conectada à saída do mesmo e que se abre para o ambiente; b) registrar a curva de pressão do reservatório em função do tempo; c) fazer tomadas da temperatura do gás no reservatório a intervalos regulares de tempo; d) calcular a derivada da curva de pressão em relação ao tempo e e) anotar a altura das colunas d'água no instante em que a pressão na entrada do fluxômetro atinge o valor desejado.

A curva de pressão no reservatório é obtida através do sinal amplificado de um transdutor de pressão piezorresistivo da Kistler, tipo 4075A50, e anotado por um registrador de papel XY-Recorder, mod. 3025 da Yokogawa. É feito um deslocamento do zero deste registrador de papel com o auxílio de uma fonte de tensão e com o objetivo de ampliar a escala na faixa de tensão desejada aumentando, com isso, a precisão dos resultados. Essas medidas são monitoradas com o auxílio de um multímetro. Um esquema do circuito utilizado é apresentado na Figura 3.

A pressão na entrada do fluxômetro é medida com o auxílio de um manômetro analógico. Esta medida é utilizada, também, como parâmetro de disparo e trava do registrador de papel: o disparo ocorrendo cerca de $0,1bar$ acima da maior pressão de trabalho estipulada e a trava, em cerca de $0,1bar$ abaixo da menor.

Para ajuste da pressão em função do tempo, são coletados de 50 a 90 pontos da curva obtida através do registrador de papel. Estes pontos são ajustados pelo método dos mínimos quadrados não linear [5]. Este método numérico permite avaliar o erro cometido em cada coeficiente ajustado; tais erros são utilizados na estimativa do erro cometido na determinação da vazão. Desta forma a derivada da curva pode ser obtida analiticamente.

De posse dos dados de temperatura do gás no reservatório, do valor da derivada da

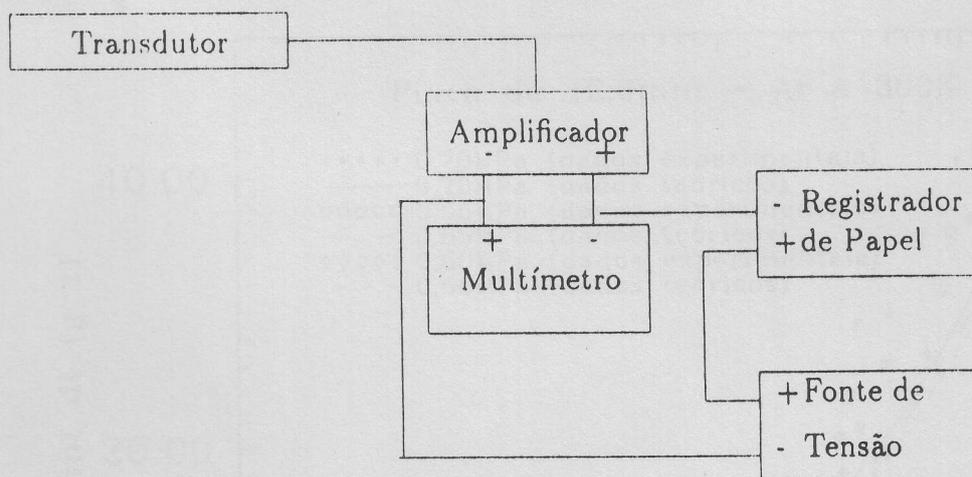


Figure 3: Circuito Para Calibração de Placas de Orifício

curva de pressão do reservatório em relação ao tempo, e do peso molecular do gás, torna-se possível calcular a vazão mássica e levantar a curva de calibração do fluxômetro.

4 Resultados e Discussão

O volume do reservatório de gás do sistema é calibrado pelo equivalente em água, com o auxílio de uma balança digital (de carga máxima igual a 100kg e erro de $3 \times 10^{-2}\text{kg}$), através de reservatórios menores, de volume previamente calibrados. O volume obtido é de $(3778 \pm 2)\text{l}$.

Para a calibração das placas de orifício, as curvas de pressão em função do tempo são ajustadas por parábolas. As curvas de calibração obtidas para os diversos fluxômetros, a serem utilizados na planta piloto de geração de energia elétrica por MHD, são apresentados nas Figuras 4 a 9. Os dados experimentais para as curvas de $0,65\text{MPa}$ das Figuras 4 e 9 são apresentados nas Tabelas 1 e 2 para fins de comparação. Medidas de vazamento no sistema mostram que são desprezíveis.

À exceção do sistema com placa de $14,0\text{mm}$, as discrepâncias entre as curvas de projeto e de calibração relativamente grandes: o coeficiente de descarga obtido é maior que aquele utilizado para cálculo. Tais resultados sugerem modificações nos cálculos para projeto, como o cálculo do coeficiente de descarga a cada ponto, a partir do número de Reynolds no orifício e/ou a modificação do comprimento dos tubos do fluxômetro antes e depois da placa.

Das curvas de calibração obtidas e das tabelas (1) e (2), observa-se que a técnica de calibração empregada permite a obtenção de dados bastante precisos para vazões de até 300g/s ($839\text{Nm}^3/\text{h}$ - com erros variando entre $0,2\%$ e $2,5\%$).

No entanto, o fato de se fazerem medidas cuja pressão na entrada do fluxômetro é próxima à pressão máxima permitida pelo turbo-compressor utilizado para alimentação do reservatório de gás, não permite a obtenção de dados para vazões superiores àquela

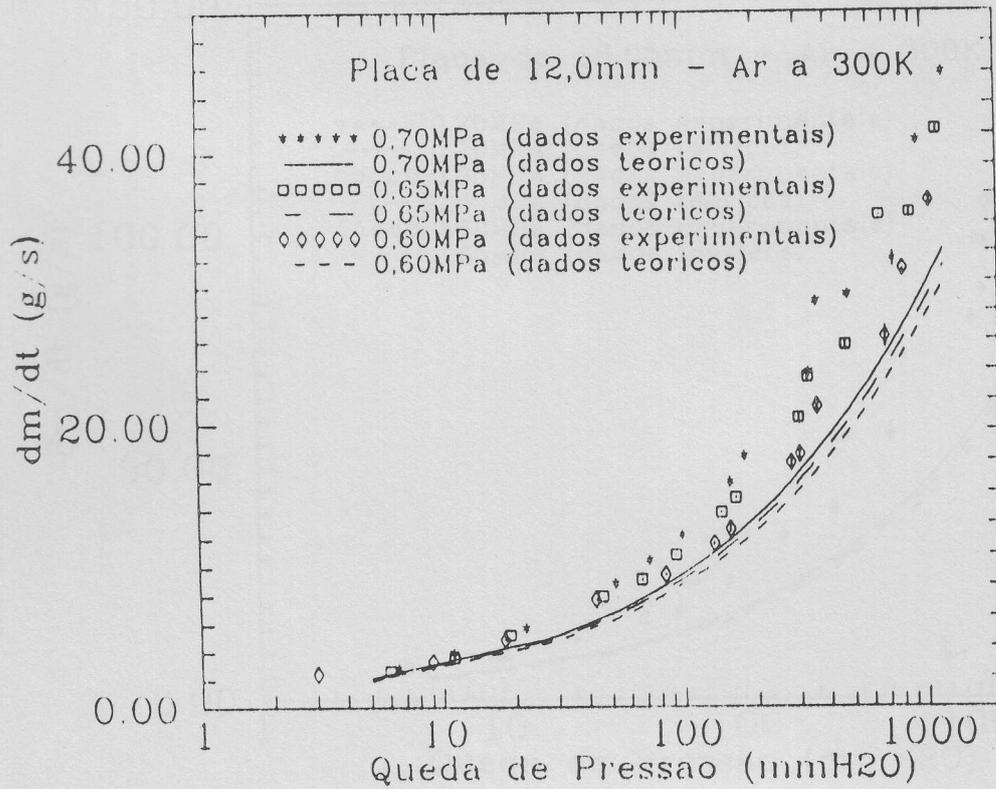


Figure 4: Curva de Calibração para Placa de 12,0mm

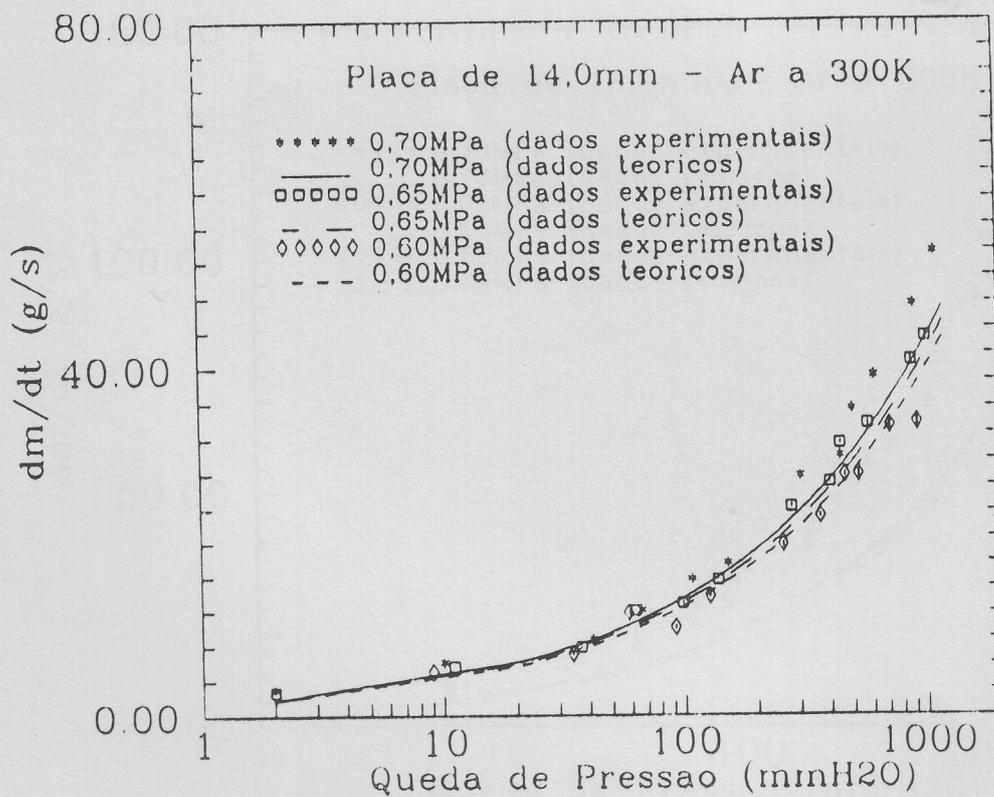


Figure 5: Curva de Calibração para Placa de 14,0mm

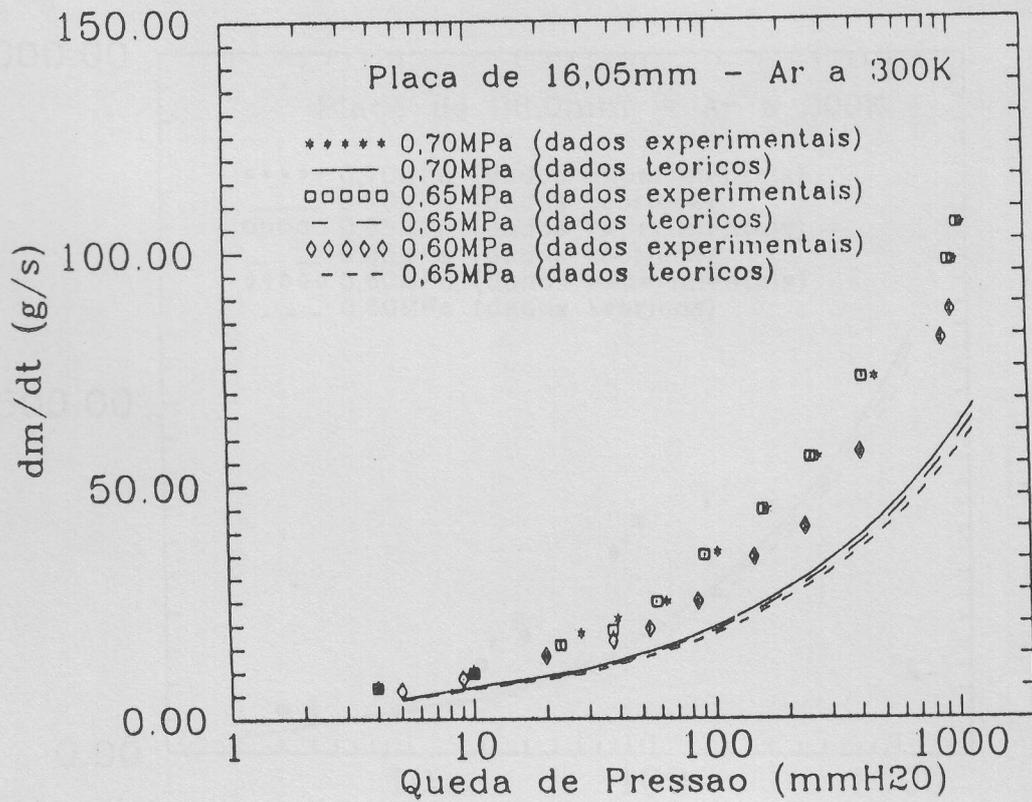


Figure 6: Curva de Calibração para Placa de 16,05mm

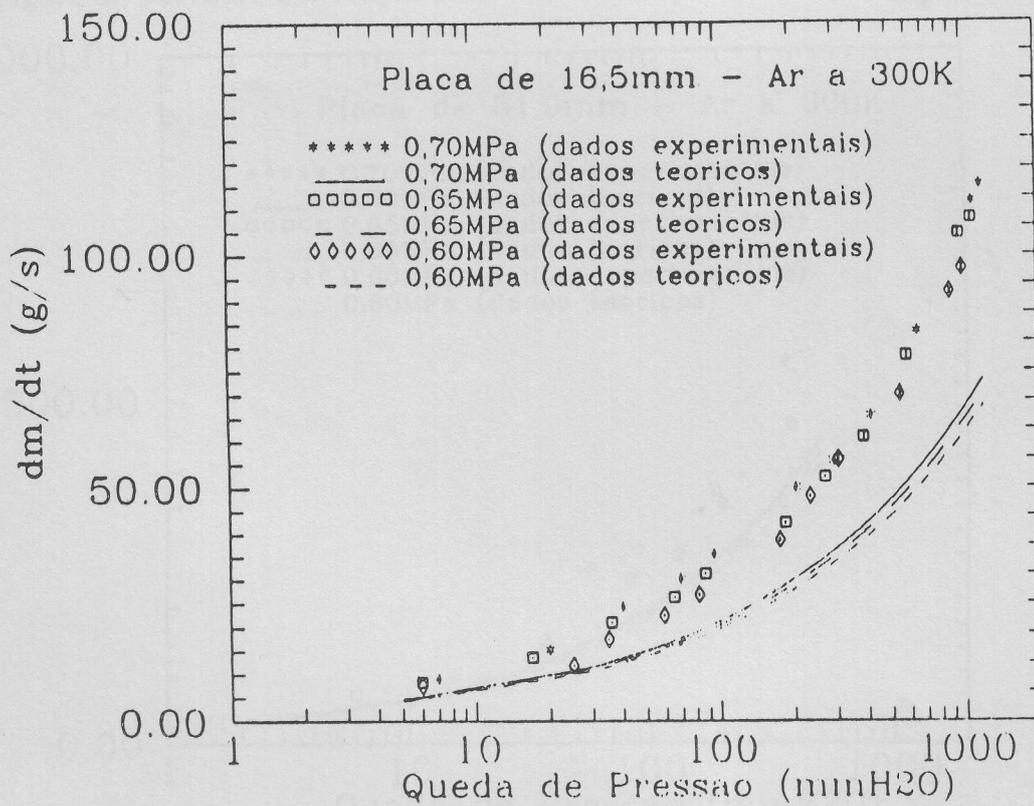


Figure 7: Curva de Calibração para Placa de 16,5mm

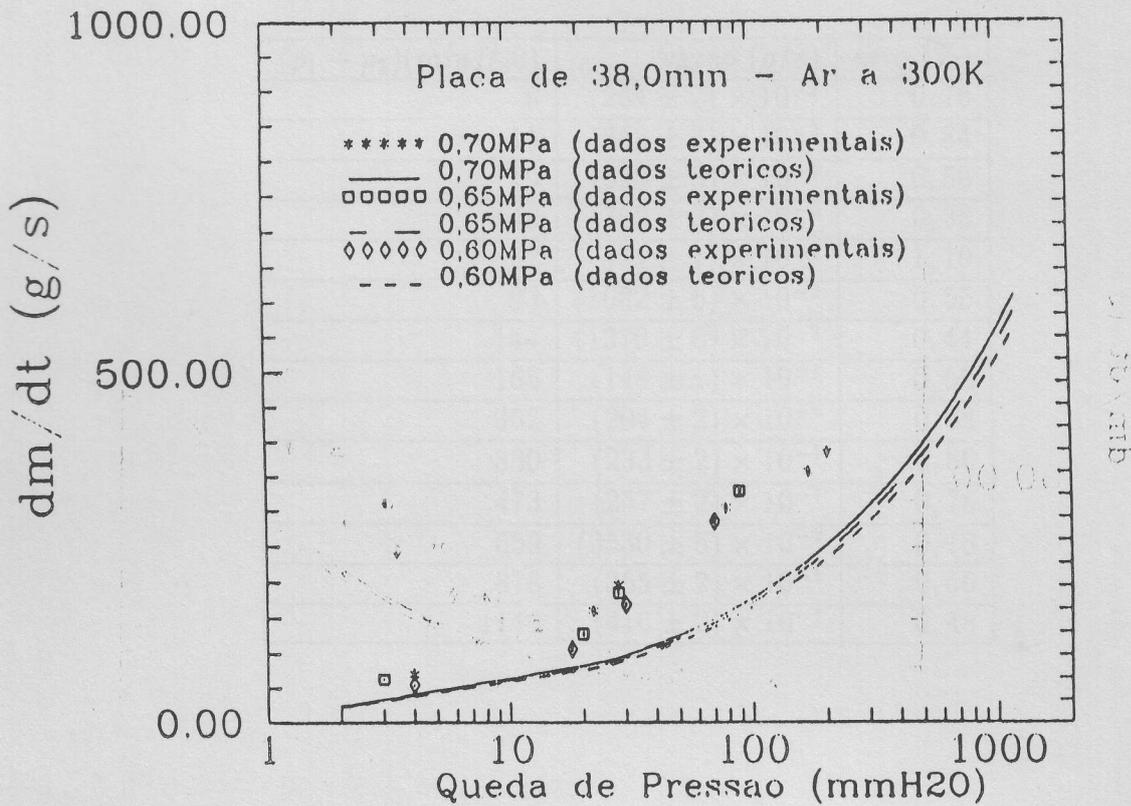


Figure 8: Curva de Calibração para Placa de 38,0mm - Tubo de 41,0mm

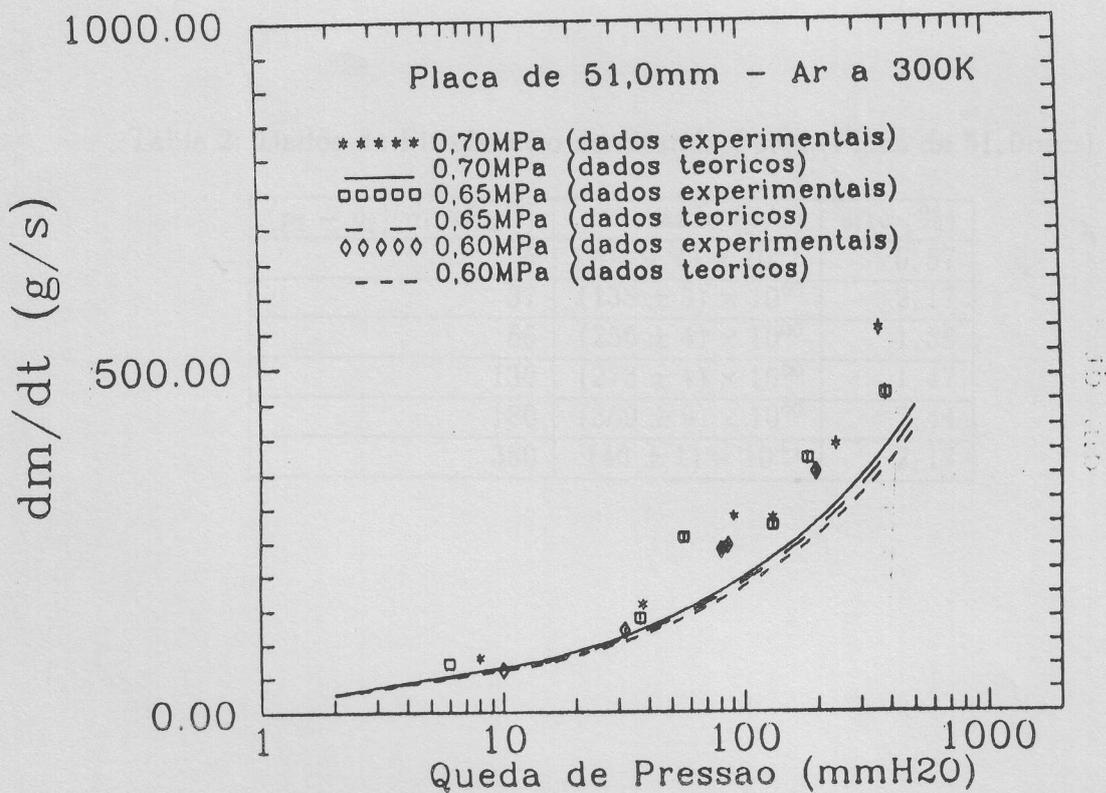


Figure 9: Curva de Calibração para Placa de 51,0mm - Tubo de 68,0mm

Table 1: Dados de Fluxômetro de Pequeno Porte (Placa de 12,0mm)

$(p_1 - p_2)(mmH_2O)$	vazão (g/s)	erro (%)
6	$(264 \pm 2) \times 10^{-2}$	0,76
11	$(358 \pm 3) \times 10^{-2}$	0,84
19	$(523 \pm 3) \times 10^{-2}$	0,58
46	$(792 \pm 3) \times 10^{-2}$	0,38
67	$(91 \pm 1) \times 10^{-1}$	1,10
93	$(1082 \pm 6) \times 10^{-2}$	0,55
144	$(1379 \pm 6) \times 10^{-2}$	0,44
165	$(148 \pm 1) \times 10^{-1}$	0,68
302	$(204 \pm 2) \times 10^{-1}$	0,98
330	$(233 \pm 2) \times 10^{-1}$	0,86
473	$(257 \pm 2) \times 10^{-1}$	0,78
659	$(3530 \pm 6) \times 10^{-2}$	0,18
878	$(355 \pm 2) \times 10^{-1}$	0,56
1140	$(416 \pm 2) \times 10^{-1}$	0,48

Table 2: Dados de Fluxômetro de Grande Porte (Placa de 51,0mm)

$(p_1 - p_2)(mmH_2O)$	vazão (g/s)	erro (%)
6	$(704 \pm 4) \times 10^{-1}$	0,57
37	$(138 \pm 3) \times 10^{00}$	2,17
56	$(256 \pm 4) \times 10^{00}$	1,56
130	$(273 \pm 4) \times 10^{00}$	1,47
180	$(369 \pm 9) \times 10^{00}$	2,44
380	$(46 \pm 1) \times 10^{+1}$	2,17

citada, pois o tempo de transiente do sistema é superior ao tempo necessário para que a pressão no reservatório de gás caia até o valor desejado para medida.

Para a solução do problema acima, sugere-se que a válvula da linha de alimentação do reservatório de gás permaneça aberta até se que o sistema se estabilize nas condições de medida, quando esta válvula é abruptamente fechada e os dados são coletados. Este procedimento torna-se viável com a utilização de gás a partir de líquidos criogênicos, visto que a pequena diferença de pressão entre o turbo-compressor e o reservatório de gás não permite obter grandes vazões e, por outro lado, a fase de testes intermitentes do combustor para aplicações em MHD conta com a instalação de evaporadores para LN_2 e LO_2 com capacidade de até $2000 Nm^3/h$.

5 Conclusões e Perspectivas

Foram projetados, construídos e calibrados seis fluxômetros de gás, tipo placa de orifício, sendo quatro de pequeno porte e dois de grande porte. Os resultados experimentais obtidos apresentaram discrepâncias com os resultados teóricos, sugerindo mudanças nos cálculos para projeto dos fluxômetros. A técnica de calibração empregada permitiu a obtenção de dados com erros inferiores a 0,5% para pequenas vazões e de até 2,5% para grandes vazões.

O tempo de transiente do sistema impediu a obtenção de dados para vazões superiores a 300g/s. Tal problema pode ser solucionado com o uso de líquidos criogênicos para fornecimento de gás ao sistema.

Os resultados experimentais obtidos justificam a automação do sistema, visando agilizar a coleta e redução dos dados, assim como, a prestação de serviços pela instituição.

References

- [1] Pinatti, D. G., Fernandes Filho, G.E.F., *The FTI Magnetohydrodynamic Program 3^o Workshop de Combustão e Propulsão* pp. 3-24, 28 a 30/11 (1989)
- [2] Vieira, C. A., *Estudo da Injeção e Combustão de Particulado para Emprego na Geração de Energia Elétrica por MHD* Dissertação de Mestrado, INPE (1994)
- [3] E. O. Doebelin *Measurements Systems - Applications and Design* pp. 465-73 - McGraw Hill, Inc. - USA (1975)
- [4] Perry, R. H., Chilton, C. H., *Manual de Engenharia Química - 5^aed.* - Ed. Guanabara Dois - Rio de Janeiro - RJ - Brasil (1980)
- [5] Bevington, P. R., *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences* New York, McGraw-Hill Book Company, 1969. 336p.

citada, pois o tempo de transiente do sistema é superior ao tempo necessário para que a pressão no reservatório de gás caia até o valor desejado para medida.

Para a solução do problema acima, sugere-se que a válvula da linha de alimentação do reservatório de gás permaneça aberta até se que o sistema se estabilize nas condições de medida, quando esta válvula é abruptamente fechada e os dados são coletados. Este procedimento torna-se viável com a utilização de gás a partir de líquidos criogênicos, visto que a pequena diferença de pressão entre o turbo-compressor e o reservatório de gás não permite obter grandes vazões e, por outro lado, a fase de testes intermitentes do combustor para aplicações em MHD conta com a instalação de evaporadores para LN_2 e LO_2 com capacidade de até $2000 Nm^3/h$.

5 Conclusões e Perspectivas

Foram projetados, construídos e calibrados seis fluxômetros de gás, tipo placa de orifício, sendo quatro de pequeno porte e dois de grande porte. Os resultados experimentais obtidos apresentaram discrepâncias com os resultados teóricos, sugerindo mudanças nos cálculos para projeto dos fluxômetros. A técnica de calibração empregada permitiu a obtenção de dados com erros inferiores a 0,5% para pequenas vazões e de até 2,5% para grandes vazões.

O tempo de transiente do sistema impediu a obtenção de dados para vazões superiores a 300g/s. Tal problema pode ser solucionado com o uso de líquidos criogênicos para fornecimento de gás ao sistema.

Os resultados experimentais obtidos justificam a automação do sistema, visando agilizar a coleta e redução dos dados, assim como, a prestação de serviços pela instituição.

References

- [1] Pinatti, D. G., Fernandes Filho, G.E.F., *The FTI Magnetohydrodynamic Program 3^o Workshop de Combustão e Propulsão* pp. 3-24, 28 a 30/11 (1989)
- [2] Vieira, C. A., *Estudo da Injeção e Combustão de Particulado para Emprego na Geração de Energia Elétrica por MHD* Dissertação de Mestrado, INPE (1994)
- [3] E. O. Doebelin *Measurements Systems - Applications and Design* pp. 465-73 - McGraw Hill, Inc. - USA (1975)
- [4] Perry, R. H., Chilton, C. H., *Manual de Engenharia Química - 5^aed.* - Ed. Guanabara Dois - Rio de Janeiro - RJ - Brasil (1980)
- [5] Bevington, P. R., *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences* New York, McGraw-Hill Book Company, 1969. 336p.