

METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO DE SISTEMA DE MEDIDA DE PRESSÃO EM TÚNEIS DE VENTO

Filipe Moraes de Souza, filipesouza@hotmail.com¹
Pedro José de Oliveira Neto, pjdonet@iae.cta.br²
Alcides Rocha da Silva, arocha@iae.cta.br²
Daniel Simão Alves Lima, daniel@iae.cta.br²
Maria Luísa Collucci da Costa Reis, mluisareis@iae.cta.br²
João Batista Pessoa Falcão Filho, jb.falcao@ig.com.br²

¹ETEP Faculdades, Av. Barão do Rio Branco, 882, São José dos Campos, SP

²IAE – Instituto de Aeronáutica e Espaço, Praça Mal. Eduardo Gomes, 50, São José dos Campos, SP, 12228-904

Resumo: *Para a realização de ensaios em túneis de vento, é comum a técnica de medição de pressão em superfícies, através do uso de pequenos orifícios de tomadas de pressão normais à superfície que, devidamente conectados a transdutores de pressão, permitem a determinação da distribuição de pressão sobre a superfície. Os gradientes de pressão variam em relação ao regime de velocidade, com diferenças de até 5.000 Pa, em escoamentos tipicamente subsônicos, chegando a 80.000 Pa, em escoamentos de alta velocidade (transônicos e supersônicos). Desta forma, os transdutores de pressão usados devem ser calibrados, com determinação de incertezas correlacionadas, para as faixas de operação compatíveis com as medidas físicas a serem observadas, para que se possa garantir a qualidade dos ensaios. Inicialmente é descrito o sistema de aquisição de dados empregado no Túnel Transônico Piloto (TTP) do Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), desde os transdutores utilizados até o programa desenvolvido em plataforma LabView®. Em seguida, são descritos os passos que resumem a metodologia empregada para a calibração do sistema de medida de pressão. São apresentadas as principais características do dispositivo laboratorial empregado e do medidor de pressão utilizado como referência, e também as características dos dois módulos de aquisição com 16 canais de pressão cada, que são o objeto da presente calibração. Cada um dos 32 transdutores é submetido a uma pressão conhecida e estável, cuja resposta em milivolts é tomada na média para cerca de 100 varreduras e é feita a correlação com o valor da pressão utilizada. A pressão de referência é modificada para vários valores, dentro da faixa de interesse, e os dados obtidos são submetidos a um ajuste de curva para determinação da melhor função de calibração, buscando-se um erro quadrático mínimo.*

Palavras-chave: *calibração, teste experimental, transdutor de pressão, túnel de vento.*

1. INTRODUÇÃO

O TTP (Túnel Transônico Piloto do IAE, Instituto de Aeronáutica e Espaço) é uma versão em escala reduzida (1:8) do projeto de um túnel transônico industrial. A Figura 1 mostra o esquema do circuito aerodinâmico do túnel, destacando seus principais componentes. O túnel possui seção de teste de dimensões 0,30 m × 0,25 m × 0,81 m, com faixa de número de Mach de 0,2 a 1,3, com pressurização do circuito de 0,5 bar a 1,2 bar, e é operado continuamente por um compressor principal axial de dois estágios com potência de 830 kW. O túnel é também dotado de um sistema auxiliar de injeção que tem operação intermitente combinada com o compressor principal para ampliar o envelope operacional. Todos os componentes do circuito aerodinâmico trabalham juntos a fim de obter condições desejáveis da velocidade do escoamento, pressão e temperatura na seção de testes, mantendo estáveis os números adimensionais de Mach e de Reynolds. Desta maneira, o TTP é uma ferramenta apropriada para a extrapolação de características aerodinâmicas do modelo ensaiado no túnel às condições reais de voo para condições em regime permanente (Pope e Goin, 1978).

A seção de teste é envolvida pela câmara plena, onde a pressão é ajustada para controlar o fluxo da massa que é extraída através de fendas longitudinais em suas paredes. Na Figura 1 podem-se ver os elementos internos à câmara plena (primeira garganta, seção de testes, flapes, segunda garganta e seção dos injetores). Vários sub-sistemas e componentes operam, uns manualmente outros automaticamente, de forma conjunta a se obter uma distribuição de propriedades o mais uniforme possível na seção de testes do túnel, para cada tipo e atitude do modelo testado. Alguns deles são o controle da rotação do compressor principal, a geometria da primeira garganta, o ângulo de alinhamento das paredes e a razão de área aberta das fendas da seção de testes, o ângulo dos flapes, a taxa de extração forçada da câmara

plana, a posição da segunda garganta, os parâmetros do sistema de injeção, e o fluxo de água no trocador de calor (Falcão Filho e Mello, 2002, Davis *et al.*, 1986).

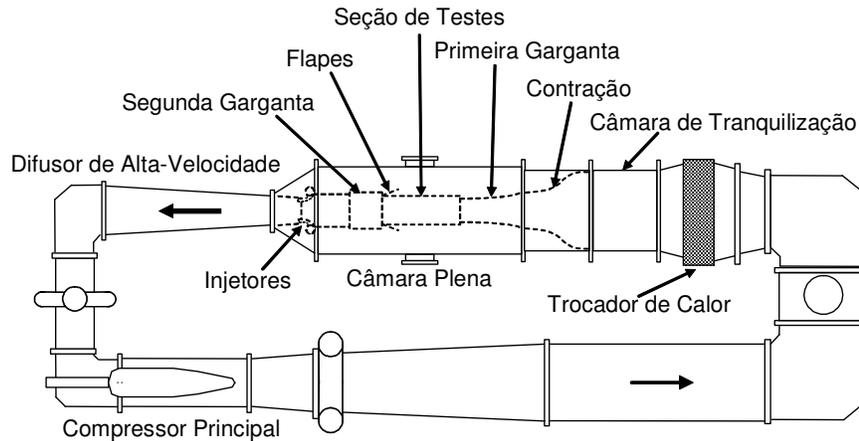


Figura 1. Esquema do circuito aerodinâmico do TTP.

O TTP está realizando atualmente dois projetos para ensaios de veículos de sondagem do IAE (VS-30 e VS-40), e espera-se uma maior demanda de ensaios a partir de agora (Falcão Filho *et al.*, 2009). O presente trabalho contribui para o aumento da produtividade do túnel, pela redução do tempo dos ensaios e aumento da confiabilidade nos resultados.

Em ensaios realizados em túneis de vento, as pressões em diferentes pontos do túnel e sobre o modelo são medidas para diversos ensaios, por exemplo, com o propósito de determinação do número de Mach nesses pontos de medida. Para isso são utilizados módulos de pressões, que com vários sensores de pressão, medem em diversos pontos, por meio de uma varredura dos canais. O desempenho dos módulos é de grande importância já que a contribuição das pressões medidas para a incerteza total dos coeficientes aerodinâmicos do ensaio é significativa. O tempo de uso, e outros fatores, como mudanças de temperatura, influência de histerese etc., podem contribuir nos desvios observados nas medições feitas pelos sensores dos módulos de pressão e, para compensar essas influências, calibrações frequentes são necessárias. Em túneis de vento isto ocorre, muitas vezes, durante a campanha de ensaios (Pope e Goin, 1978). O propósito da calibração é fornecer os coeficientes da curva de calibração que relacionam as grandezas medidas. Para a calibração, pressões conhecidas são fornecidas para o levantamento das características de calibração linear dos sensores de cada canal do módulo. Os parâmetros da modelagem matemática são avaliados empregando o método de ajuste por mínimos quadrados. As experiências foram feitas com os módulos de pressão diferencial tipo PSI (da firma norte americana, Esterline Pressure Systems, PSI (2000)), que são utilizados nos ensaios do TTP.

Em particular, o processo aqui proposto permite que a calibração seja realizada com os módulos no local de utilização nos ensaios do túnel, com as mesmas conexões e cablagens, o que garante uma confiabilidade maior para os resultados obtidos durante os ensaios no túnel.

2. METODOLOGIA

Basicamente a metodologia aplicada para a calibração de sensores de pressão é feita por comparação de leituras entre o sensor a ser calibrado e um sensor considerado como referência. Em geral, o que difere entre os processos é a forma como é aplicada a pressão, se por meio de uma fonte de pressão (por exemplo, por uma válvula reguladora ou um reservatório) ou por meio de peso morto sobre um pistão que gera a pressão necessária na linha comum (ISA, 1980). No presente caso faz-se uso de uma pressão armazenada num reservatório de dimensão suficiente para que a pressão possa ser considerada estável durante as medidas.

2.1. Modelagem Matemática

Para cada valor de pressão medido e para cada canal, as saídas dos transdutores de pressão são lidas 100 vezes e o valor médio e desvio padrão são calculados por

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n}, \quad (1)$$

$$S_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (2)$$

Nas Eqs. (1) e (2), n corresponde ao número de aquisições de leitura de saídas elétricas fornecidas pelas pontes de Wheatstone, X_i é o valor do sinal de saída da i -ésima varredura e \bar{X} é o valor médio das leituras.

A correlação entre os valores de pressão e os sinais de tensão emitidos pelas saídas dos transdutores de cada canal foi obtida calculando-se o quadrado do coeficiente de correlação através da equação:

$$r^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y - \bar{Y})^2}} \right]^2 \quad (3)$$

Na Eq. (3), X corresponde aos valores dos sinais elétricos de saídas das leituras e Y corresponde aos valores de pressão.

Seguindo a metodologia de ajuste por mínimos quadrados descrita em Press *et al.* (1992), uma curva de calibração é ajustada para cada canal do módulo de pressão.

A incerteza do valor da tensão calculada através da equação da curva de calibração é obtida através da equação:

$$u_V^2 = u_a^2 + P^2 u_b^2 + b^2 u_x^2 + 2[P u(a, b)]. \quad (4)$$

Na Eq. (4), u_V é a incerteza do valor calculado da tensão (V), P é o valor da pressão, a e b são os coeficientes (linear e angular, respectivamente) da curva de calibração.

2.2. Instalação Utilizada

A Figura 2 mostra o esquema da instalação utilizada na calibração, composta por um reservatório, três válvulas de controle manuais, distribuidores de pressão, módulos de sensores de pressão, medidor de pressão de referência e sistema de aquisição/controle por micro-computador. As ligações pneumáticas foram realizadas por meio de tubos flexíveis de silicone com diâmetro interno de 1 mm e diâmetro externo de 3,5 mm.

O ar comprimido que é gerado no sistema de ar de serviço do TTP é tratado para garantir isenção de óleo e água e é admitido para o reservatório de pressão através da válvula V1. Depois que a pressão é ajustada e estabilizada, a válvula V2 é aberta para que a pressão seja fornecida a cada transdutor de pressão interno aos módulos de pressão, os quais fornecem saída analógica em V para o sistema de aquisição/controle de dados. A válvula V3 é utilizada para liberar o ar para a atmosfera, despressurizando o sistema, quando necessário. Para a calibração, a pressão considerada padrão no sistema é lida pelo medidor de pressão absoluta de referência.

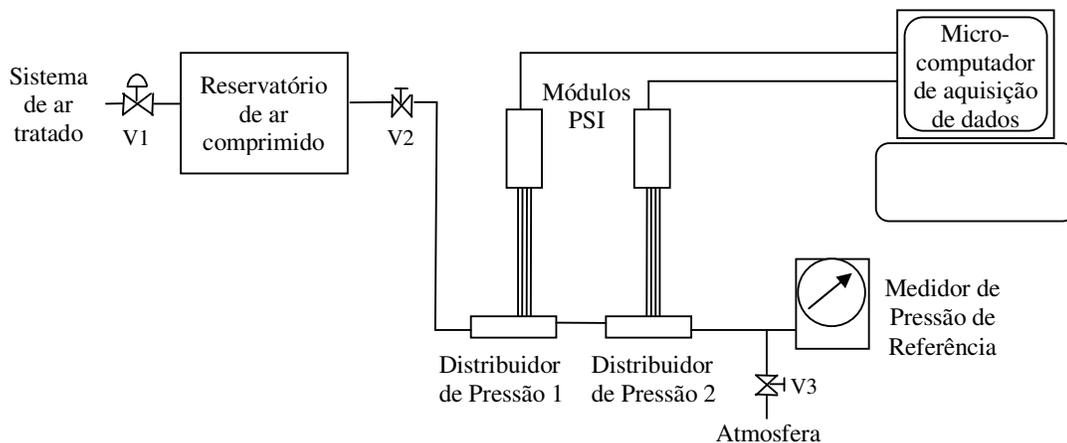


Figura 2. Esquema do sistema de calibração.

A Figura 3 mostra fotos de alguns dos componentes empregados na montagem do esquema da Fig. 2. Nos próximos sub-itens serão descritas as principais características técnicas dos componentes apresentados na figura.

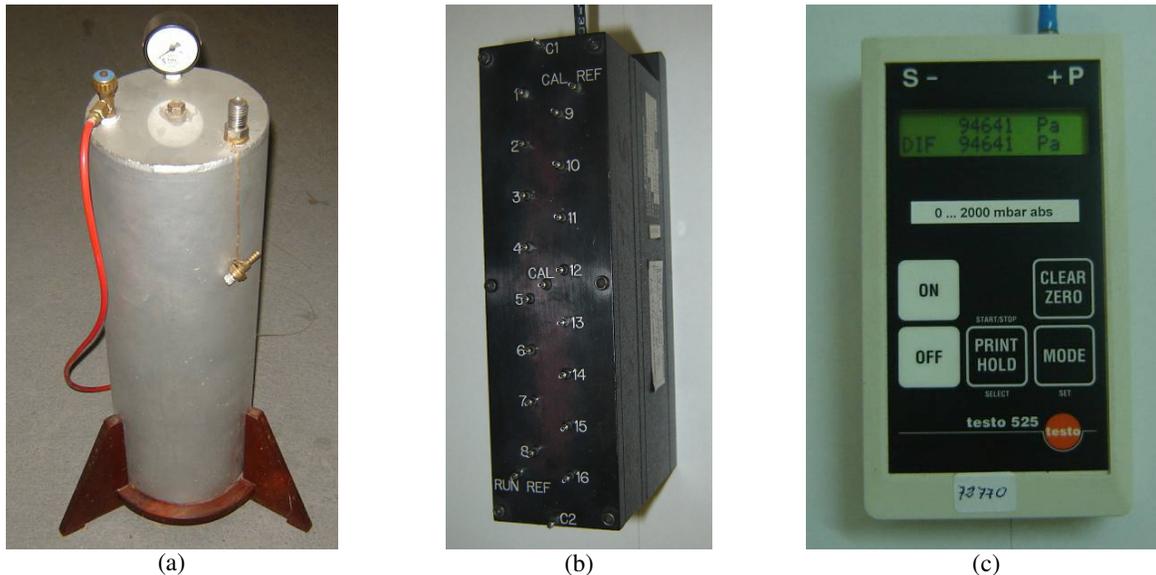


Figura 3. Fotos do reservatório (a), módulo de pressão PSI (b) e medidor de pressão de referência (c).

2.2.1. Reservatório de Pressão

A utilização de um reservatório de pressão foi necessária para manter a pressão estável durante as medidas (Fig. 3(a)). Desta forma, evitam-se variações de pressão causadas por eventuais vazamentos de ar nas conexões, variações de temperatura e acomodação das partes mecânicas aos novos valores de pressão ajustados. O reservatório construído em aço, tem forma cilíndrica, com tampos chatos soldados, com capacidade nominal de 11,35 litros e pressão de trabalho máxima de 6,9 bar.

2.2.2. Módulos PSI

O TTP dispõe de dois módulos modelo ESP-16BP da firma Esterline Pressure Systems (PSI, 2000) com 16 canais de pressão em cada módulo (Fig. 3(b)). Os módulos são compostos de sensores para aquisição de dados de pressão diferencial, com alta exatidão, que varrem os 16 transdutores de pressão, com elemento sensor de silício, cujas saídas analógicas são multiplexadas dentro dos mesmos. Cada módulo pode ser endereçado por meio de um código binário de 4 bits, com taxas de até 20.000 leituras por segundo e sinal digital de leitura por meio de um código binário de 12 bits. As saídas analógicas são amplificadas internamente para fornecer saída padrão com fundo de escala de $\pm 2,5$ VDC. Os módulos possuem válvula interna que permite aos transdutores serem calibrados durante a utilização. Entretanto, com o intuito de reproduzir o mais fielmente possível o processo que ocorre durante a operação normal dos módulos, adotou-se aplicar pressão diretamente nas 16 tomadas de pressão.

Todo o sistema de aquisição de dados é controlado e monitorado por programa desenvolvido em plataforma LabView® em micro-computador. A calibração consiste em aplicar várias pressões conhecidas, por meio da leitura do medidor de pressão de referência, que são comparadas com as leituras dos módulos, para levantamento das características de calibração linear de cada um dos sensores.

2.2.3. Medidor de Pressão de Referência

O medidor de pressão de referência empregado é o de fabricação TESTO (Testo, 2002), que é firma tradicional em instrumentos de precisão, modelo 0560 5273, com leitura de pressão absoluta, na faixa de leitura de 0 Pa a 2×10^5 Pa, com precisão de ± 100 Pa, resolução de 100 Pa e sobre-pressão limite de 3×10^5 Pa (Fig. 3(c)).

2.2.4. Distribuidores de Pressão

Para aplicação da pressão do reservatório nas tomadas dos módulos, foram confeccionados dois distribuidores de pressão com 18 canais cada, todos interligados. A Figura 4 apresenta o esquema e a foto do distribuidor de pressão mostrando as passagens internas. Os distribuidores de pressão foram confeccionados a partir de blocos de alumínio,

cujas ligações internas foram feitas por brocas de furação e colados tubos capilares. Depois de prontos, os distribuidores foram submetidos a testes de estanqueidade e pressão.

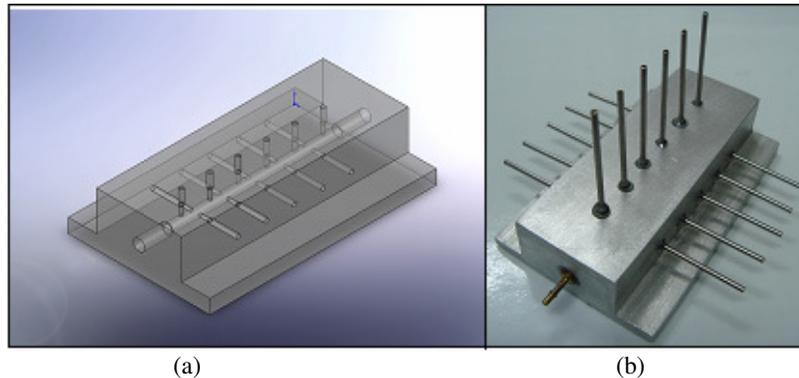


Figura 4. Distribuidor de Pressão: (a) esquema das ligações internas (b) foto do mesmo.

2.2.5. Sistema de Aquisição/Controle

Os equipamentos utilizados para a aquisição de dados e o controle dos módulos são: um microcomputador com programa Labview®, dois módulos de pressão diferencial (ESP-16BP) da firma PSI, com fundo de escala de +/- 10 psi (+/- 69 kPa), com 16 canais cada, e uma placa de aquisição de dados ATMIO 16X de 12 bits, do fabricante National Instruments (NI, 1994).

A Figura 5 mostra um esquema do sistema de aquisição de dados utilizado. Os dados adquiridos são os sinais de pressão provenientes de sensores piezo-resistivos dos módulos de pressão. Os piezo-resistores são conectados a uma ponte de wheatstone, configurada para gerar uma tensão de saída diretamente proporcional à pressão aplicada. A faixa de sinal de entrada da placa é de -2,5 V a +2,5 V, o número de amostras adotado no processo de calibração é de 100 varreduras para cada valor lido de pressão, a frequência de amostragens é de 0,625 Hz e a resolução do instrumento é de 0,00122 V. Um programa desenvolvido em plataforma Labview® é utilizado para o controle do sistema de aquisição de dados por meio de um microcomputador.

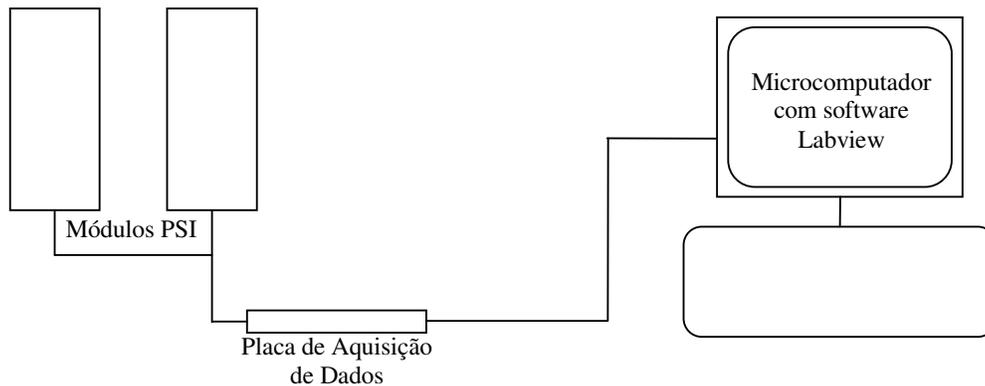


Figura 5. Esquema do Sistema de Aquisição de Dados.

A Figura 6 mostra o painel de controle do programa desenvolvido em LabView® para a aquisição de dados. O mesmo programa é utilizado tanto para a calibração quanto para a leitura durante os ensaios. Assim, algumas funções só são aplicáveis quando em uso normal de aquisição de dados das experiências.

Para a calibração, não é necessária a leitura de zeros, pois quer-se o relacionamento real entre os parâmetros da pressão (P) e da tensão (V) nos sensores. Após o ajuste da pressão no sistema, inicia-se o processo de aquisição que deverá ter no mínimo 100 varreduras. Ao término da aquisição faz-se a gravação com a chave no painel na posição "V" (Fig. 6). É desejável a realização da calibração completa num prazo mínimo para diminuir o efeito das condições ambientais no desempenho dos componentes eletrônicos.

Para o uso em ensaio no túnel de vento, inicialmente, com todas as tomadas ligadas à condição ambiente, faz-se uma leitura de zeros que consiste em 100 varreduras dos sinais de saída em V. O programa realiza uma média simples cujo valor serve para subtrair do valor lido em cada condição. Isto porque, o valor elétrico de saída do sensor depende de outros fatores não controláveis, como o desempenho dos componentes eletrônicos. Assim, a leitura de zero será

utilizada para obter-se o diferencial efetivo do sinal. Após a experiência realizada, interrompe-se a aquisição de dados e faz-se a gravação com a chave no painel na posição “PSI” – gravação dos valores de pressão. Este modo já deverá incorporar as curvas de cada um dos sensores obtidas durante o processo de calibração, e que permitem a determinação do valor calibrado. A qualquer tempo, pode-se visualizar os valores ajustados para os canais de mesma ordem nos dois módulos.

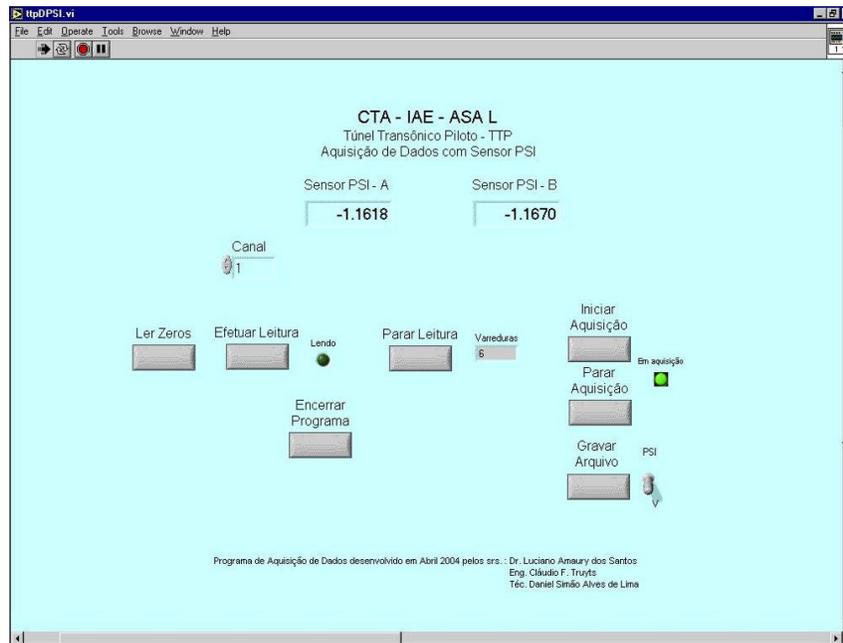


Figura 6. Painel de controle LabView® durante a aquisição dos dois módulos (A e B).

2.3. Passos da Calibração

A calibração dos módulos de pressão envolve a aplicação de pressões de valores conhecidos aos módulos e o registro das leituras dos sensores. Na maioria dos casos, como neste procedimento de calibração, a tomada “RUN REF” da Fig. 3(b) é aberta para o ambiente (pressão atmosférica) – desta maneira é preciso leitura da pressão ambiente (p_{amb}) por meio de um medidor com boa precisão para obtenção do valor da pressão absoluta (p_a) a partir do valor de pressão diferencial lida pelo instrumento (Δp):

$$p_a = p_{amb} - \Delta p. \quad (5)$$

Foi utilizado o mesmo medidor de referência para determinação da pressão ambiente no início de cada procedimento de medida.

Para a calibração foram fornecidos 41 valores diferentes de pressão aos módulos. No início os sensores são ligados à atmosfera, durante um determinado intervalo, para a leitura dos “zeros” dos sensores. O programa calcula médias simples dos valores lidos em V relativos aos zeros de cada sensor, que serão subtraídos dos valores lidos para outras pressões. Para cada sensor só um valor de “zero” foi lido durante toda a experiência. A seguir, a pressão no sistema é ajustada, em intervalos de aproximadamente 6,9 kPa até a pressão máxima de + 69 kPa (correspondente ao fundo de escala positivo de + 10 psi dos sensores dos módulos PSI). Para cada pressão ajustada foram feitas 100 varreduras, num intervalo de tempo de 160 s. Cada pressão foi lida 2 vezes, quando foram ajustados valores crescentes e decrescentes em toda a faixa positiva de operação dos sensores até o retorno à pressão ambiente. Este procedimento é utilizado para verificação da existência de histerese nos transdutores de pressão. Na verdade, um mesmo valor ajustado na subida e na descida foi obtido apenas aproximadamente, uma vez que não há um sistema automático de ajuste de pressão, sendo o mesmo feito por meio de ajuste manual. Além disso, um pequeno desvio sempre ocorre devido à acomodação do sinal de pressão, ao equilíbrio térmico entre o reservatório e o ambiente e à acomodação das partes mecânicas ao novo nível de pressão. Por isso, cada leitura é realizada após um tempo suficiente para estabilização do valor da pressão (cerca de 15 s).

Para uma calibração completa é necessário também repetir o mesmo procedimento para pressões negativas (abaixo da pressão ambiente). Isto pode ser conseguido ajustando pressões negativas com uma bomba de vácuo ligada ao reservatório. Mas há outra maneira possível, que foi a adotada neste trabalho. Em vez de aplicar pressão negativa aos 16 canais de cada módulo, aplica-se pressão positiva à tomada de referência “RUN REF” de cada módulo (ver Fig. 3(b)) abrindo as tomadas dos 16 canais para o ambiente – isto causa um esforço de sentido contrário no diafragma do sensor,

que simula perfeitamente a operação do mesmo para valores negativos. E, assim, repete-se o mesmo procedimento de subida e descida da pressão ajustada no reservatório em intervalos, terminando com o último ponto de leitura com pressão ambiente.

É recomendado que todo o processo de calibração seja realizado num mesmo dia, evitando possíveis alterações significativas nas condições ambientais. Também é importante destacar que este procedimento deve ser realizado numa determinada frequência a ser definida em termos da cadência de ensaios etc. Entretanto, recomenda-se um procedimento de verificação antes de qualquer ensaio a ser realizado no túnel de vento, por meio de aplicação de valor conhecido de pressão e determinação do erro médio de leitura durante um determinado intervalo de tempo, por exemplo, 160 segundos.

3. RESULTADOS

A Tabela 1 apresenta os valores de pressão aplicados e o valor médio de tensão (com o desvio padrão) de 100 varreduras do canal 1. Para cada um dos 32 canais foram levantadas tabelas semelhantes.

Tabela 1. Planilha de valores de pressão aplicados para a leitura da tensão no canal 1, para 41 pontos de ensaio.

	Pressão (Pa)	Tensão (V)		Pressão (Pa)	Tensão (V)
P01	0 ± 100	0,0249 ± 0,0042	P22	-6943 ± 100	-0,2066 ± 0,0039
P02	7250 ± 100	0,2661 ± 0,0037	P23	-14112 ± 100	-0,4435 ± 0,0039
P03	13802 ± 100	0,4854 ± 0,0041	P24	-20651 ± 100	-0,6596 ± 0,0037
P04	20771 ± 100	0,7136 ± 0,0036	P25	-28604 ± 100	-0,9049 ± 0,0039
P05	27514 ± 100	0,9384 ± 0,0034	P26	-34444 ± 100	-1,1161 ± 0,0043
P06	34537 ± 100	1,1710 ± 0,0034	P27	-41196 ± 100	-1,3401 ± 0,0040
P07	41538 ± 100	1,4038 ± 0,0036	P28	-48285 ± 100	-1,5759 ± 0,0034
P08	48576 ± 100	1,6378 ± 0,0041	P29	-55130 ± 100	-1,8022 ± 0,0037
P09	56671 ± 100	1,9080 ± 0,0037	P30	-62115 ± 100	-2,0326 ± 0,0040
P10	62244 ± 100	2,0919 ± 0,0041	P31	-69134 ± 100	-2,2657 ± 0,0040
P11	68979 ± 100	2,3172 ± 0,0190	P32	-62025 ± 100	-2,0292 ± 0,0042
P12	62373 ± 100	2,0952 ± 0,0041	P33	-55105 ± 100	-1,7991 ± 0,0039
P13	56556 ± 100	1,9016 ± 0,0042	P34	-47933 ± 100	-1,5632 ± 0,0041
P14	48486 ± 100	1,6344 ± 0,0044	P35	-41397 ± 100	-1,3470 ± 0,0038
P15	41569 ± 100	1,4053 ± 0,0041	P36	-34521 ± 100	-1,1193 ± 0,0039
P16	34306 ± 100	1,1638 ± 0,0039	P37	-27698 ± 100	-0,8924 ± 0,0040
P17	27556 ± 100	0,9394 ± 0,0036	P38	-20723 ± 100	-0,6616 ± 0,0038
P18	20687 ± 100	0,7112 ± 0,0041	P39	-13824 ± 100	-0,4334 ± 0,0036
P19	13757 ± 100	0,4820 ± 0,0040	P40	-6910 ± 100	-0,2042 ± 0,0041
P20	6904 ± 100	0,2546 ± 0,0036	P41	0 ± 100	+0,0247 ± 0,0033
P21	0 ± 100	0,0238 ± 0,0036			

A relação entre os valores de pressão reais (pelo medidor de pressão de referência) e os valores de tensão fornecidos pelo transdutor de pressão do canal 1 é mostrada nas Figs. 7 e 8, para valores positivos e negativos, respectivamente. Não foi possível observar qualquer indício de efeito de histerese nos módulos de sensores. Fica claro nas figuras a boa concordância dos pontos com tendência linear. De um modo geral, a boa correlação ficou comprovada pelo valor determinado para o coeficiente de correlação, obtido a partir da Eq. (3), de $(1 - r^2) = 1 \times 10^{-6}$.

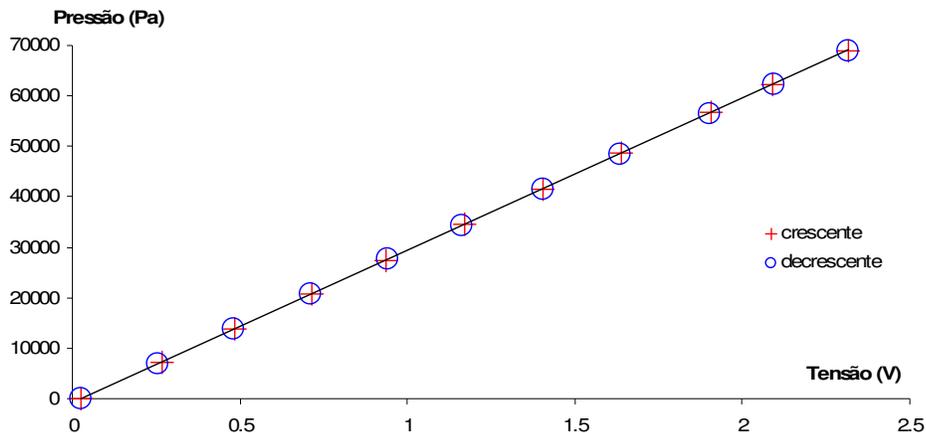


Figura 7. Relação entre pressão positiva e tensão.

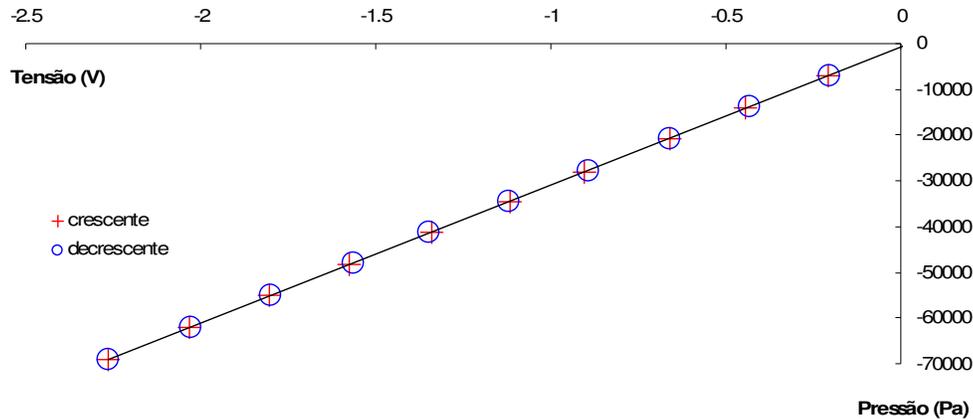


Figura 8. Relação entre pressão negativa e tensão.

A boa correlação observada permite sugerir uma frequência menor na realização dos ensaios de calibração, contanto que a verificação antes do ensaio, conforme recomendado no sub-item 2.3, comprove este padrão de comportamento do equipamento.

A Tabela 2 mostra os resultados finais obtidos para a calibração de todos os canais, com as equações que definem a correlação entre os valores de pressão e tensão, e a incerteza de cada canal, calculada através da Eq. (4). Na tabela, a pressão (P) é em Pascal e a tensão (V) em volts. Os valores dos coeficientes serão colocados no programa desenvolvido em LabView® para utilização durante os experimentos a serem realizados no túnel. Assim, a gravação do arquivo de resultados poderá ser feito no modo PSI (Fig. 6) com os valores já ajustados pela presente calibração.

Tabela 2. Resultados da calibração.

Módulo 1			Módulo 2		
canal	curva de calibração	incerteza	canal	curva de calibração	incerteza
1	$V = +0,01636 + 3,44672 \times 10^{-5} (P)$	0,00364	1	$V = -0,05130 + 2,77186 \times 10^{-5} (P)$	0,00305
2	$V = +0,02153 + 3,26376 \times 10^{-5} (P)$	0,00347	2	$V = -0,04298 + 3,08154 \times 10^{-5} (P)$	0,00333
3	$V = +0,02660 + 3,48769 \times 10^{-5} (P)$	0,00368	3	$V = -0,03263 + 3,12795 \times 10^{-5} (P)$	0,00336
4	$V = -0,00019 + 3,35764 \times 10^{-5} (P)$	0,00355	4	$V = -0,05588 + 3,17895 \times 10^{-5} (P)$	0,00343
5	$V = +0,03241 + 3,29118 \times 10^{-5} (P)$	0,00349	5	$V = -0,04397 + 3,13212 \times 10^{-5} (P)$	0,00337
6	$V = +0,02114 + 3,26541 \times 10^{-5} (P)$	0,00347	6	$V = -0,04147 + 3,09589 \times 10^{-5} (P)$	0,00333
7	$V = +0,02112 + 3,20740 \times 10^{-5} (P)$	0,00342	7	$V = -0,02851 + 3,24837 \times 10^{-5} (P)$	0,00348
8	$V = -0,01021 + 3,25391 \times 10^{-5} (P)$	0,00347	8	$V = -0,04596 + 3,02118 \times 10^{-5} (P)$	0,00328
9	$V = +0,01664 + 3,33328 \times 10^{-5} (P)$	0,00352	9	$V = -0,05423 + 3,06669 \times 10^{-5} (P)$	0,00329
10	$V = +0,02008 + 3,51502 \times 10^{-5} (P)$	0,00370	10	$V = -0,04168 + 3,20248 \times 10^{-5} (P)$	0,00344
11	$V = +0,01245 + 3,25131 \times 10^{-5} (P)$	0,00347	11	$V = -0,03617 + 3,12746 \times 10^{-5} (P)$	0,00337
12	$V = +0,02744 + 3,29379 \times 10^{-5} (P)$	0,00351	12	$V = -0,04885 + 3,15722 \times 10^{-5} (P)$	0,00339
13	$V = +0,01985 + 3,30782 \times 10^{-5} (P)$	0,00354	13	$V = -0,03858 + 3,08873 \times 10^{-5} (P)$	0,00335
14	$V = +0,01567 + 3,23995 \times 10^{-5} (P)$	0,00348	14	$V = -0,07097 + 3,09513 \times 10^{-5} (P)$	0,00337
15	$V = +0,01828 + 3,32059 \times 10^{-5} (P)$	0,00355	15	$V = -0,04260 + 3,17720 \times 10^{-5} (P)$	0,00346
16	$V = +0,02589 + 3,31638 \times 10^{-5} (P)$	0,00356	16	$V = +0,11702 + 3,19042 \times 10^{-5} (P)$	0,00347

As curvas de calibração estão dadas na forma direta. Algumas vezes é desejável uma manipulação matemática para obtenção das curvas na forma inversa, ou seja, expressa-se o valor da pressão (P) em função da tensão lida (V).

4. CONCLUSÕES

Foi apresentada metodologia para a calibração dos módulos de sensores de pressão diferencial para uso em ensaios no Túnel Transônico Piloto do IAE, com descrição do aparato utilizado, características dos componentes e estabelecimento dos passos seguidos no processo de calibração.

Foram apresentados os resultados obtidos, em termos dos coeficientes de curva de calibração para cada sensor de pressão, com os desvios relacionados. O equipamento utilizado mostrou-se de excelente desempenho, não apresentando histerese e tendo uma correlação praticamente linear.

O trabalho contribui para o aumento da produtividade do túnel, pela redução no tempo dos ensaios e aumento de confiabilidade nos resultados, permitindo uma calibração no local da utilização para os ensaios no túnel, com as mesmas conexões e cablagens.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à AEB (Agência Espacial Brasileira), ao DCTA (Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial) e ao IAE (Instituto de Aeronáutica e Espaço), pela viabilização deste trabalho, e ao **CNPq** – processo nº 119235/2009-9 pelo auxílio de bolsa PIBIC.

6. REFERÊNCIAS

- Davis, M. W., Gunn, J. A., Herron, R. D., Kraft, E. M., “Optimum Transonic Wind Tunnel,” from AIAA Aerodynamic Testing Conference, 14., West Palm Beach,
- Falcão Filho, J. B. P., Mello, O. A. F., 2002, “Descrição Técnica do Túnel Transônico Piloto do Centro Técnico Aeroespacial”, Anais ... IX Congresso Brasileiro de Ciências Térmicas e Engenharia, ENCIT-2002, Caxambu-MG, artigo CIT02-0251.
- Falcão Filho, J. B. P., Avelar, A. C., Reis, M. L. C. C., 2009, “Historical Review and Future Perspectives for the Pilot Transonic Wind Tunnel of IAE”, Journal of Aerospace and Technology and Management, Vol. 1, no. 1, pp. 19-27.
- ISA, 1980, “Measurement Uncertainty Handbook,” Handbook of Uncertainty in Gas Turbine Measurements, uma reimpressão do relatório NTIS AEDC-TR-73-5, The Aerospace Industries Division of ISA (Instrument Society of America).
- NI, 1994, “AT-MIO-64F-5, User Manual – Multifunction I/O Board for the PC AT/EISA”, Part Number 320487-01, from National Instruments Corporation.
- Pope, A., Goin, K. L., 1978, High-Speed Wind Tunnel Testing, John Wiley & Sons, New York.
- Press, W. H. Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. Flannery B. P., 1992, “Numerical Recipes”, Cambridge University Press, 2nd ed.
- PSI, 2000, “ESP-16BP Pressure Scanner User’s Manual,” catálogo de produto da firma Esterline Pressure Systems 3rd Edition – www.pressuresystems.com.
- Testo, 2000, “Instrumentos Portáteis de Medição”, catálogo de produto da firma Testo do Brasil Instrumentos de Medição Ltda. – www.testo.com.br.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

METODOLOGY OF PRESSURE MEASUREMENT SYSTEM CALIBRATION IN WIND TUNNELS

Filipe Moraes de Souza, filipesouza@hotmail.com¹
Pedro José de Oliveira Neto, pjdonet@iae.cta.br²
Alcides Rocha da Silva, arocha@iae.cta.br²
Daniel Simão Alves Lima, daniel@iae.cta.br²
Maria Luísa Collucci da Costa Reis, mluisareis@iae.cta.br²
João Batista Pessoa Falcão Filho, jb.falcao@ig.com.br²

¹ETEP Faculdades, Av. Barão do Rio Branco, 882, São José dos Campos, SP.

²Instituto de Aeronáutica e Espaço, Praça Mal. Eduardo Gomes, 50, São José dos Campos, SP, 12228-904

Abstract. *It is very common to use surface pressure measurements techniques in wind tunnels tests by using small pressure taps orthogonally drilled to the surface. These taps are connected to pressure sensors to obtain pressure distribution over the surface. Pressure gradients have a large variation as a function of the speed regime, with differences that may reach 5,000 Pa in subsonic flow, and 80,000 Pa in high-speed flow (transonic and supersonic). This way, the pressure sensors to be used in the wind tunnel tests must be calibrated accordingly, and the correlated uncertainties shall be determined, within each operational range, with the same observed physical measures, in order to guarantee the test results quality. Firstly, the acquisition system used in the Pilot Transonic Tunnel (TTP) of the Institute of Aeronautics and Space (IAE) is described. Following, the main steps followed during the pressure calibration procedure are presented. This paper also describes the characteristics of the TTP main components, the pressure transducer adopted as reference, and the two 16-channels pressure module, which is the object of the present calibration. Each one of the 32 sensors is submitted to a known and stable applied pressure value. The pressure is applied in steps within the considered range. The results are used to obtain a curve fit to determine the best function correlation in order to result in a minimum quadratic error.*

Keywords: *Wind tunnel, experimental test, calibration, pressure transducer.*

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.