

Análise de um sensor de pressão submetido a um sinal degrau

Flavio Roberto Faciolla Theodoro¹, **Maria Luísa Collucci da Costa Reis**², **Carlos d'Andrade Souto**³

¹ I Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, São José dos Campos, Brasil; ^{2,3} Instituto de Aeronáutica e Espaço – IAE, São José dos Campos, Brasil.

E-mail: flavio.theodoro@aedu.com

Resumo: Este artigo analisa a resposta temporal de um sensor de pressão submetido a um sinal degrau gerado por um tubo de choque e compara suas respostas teóricas e experimentais. O objetivo é fornecer um método para caracterizar metrologicamente o sensor determinando suas incertezas associadas usando a Lei de Propagação de Incertezas e Método de Monte Carlo. Como resultado conseguiu-se uma metodologia para estimar incerteza nos parâmetros que caracterizam dinamicamente o sensor (amortecimento e frequência natural). Os experimentos são realizados no Instituto de Estudos Avançados (IEAv), Brasil.

Palavras-chave: Calibração Dinâmica, Tubo de Choque, Sensores.

Abstract: This article analyzes the time response of a pressure sensor submitted to step signal produced in the shock tube. The theoretical and experimental data are compared. In this study, the goal is to characterize the sensor metrologically using the Law of Propagation of uncertainties and Monte Carlo method to estimate the uncertainties. In results was determined a methodology to estimate uncertainty in the parameters that dynamically characterize the sensor (damping and natural frequency). The experiments are performed in the Institute of Advanced Studies (IEAv), Brazil.

Keywords: Dynamic Calibration, Shock Tube, Sensors.

1. INTRODUÇÃO

As aplicações que demandam calibrações dinâmicas são aquelas cujo sensor trabalha sob uma variação muito brusca e significativa do sinal no tempo. Sensores de pressão que operam nestas condições podem ser encontrados no ramo da balística, automobilística, medicina, aeroespacial, entre outros.

O documento “*A Guide for the Dynamic Calibration of Pressure Transducers*” [1] é um dos principais documentos sobre calibração dinâmica

de sensores de pressão e descreve métodos e meios existentes, no entanto, ainda não há uma metodologia reconhecida como satisfatória para atender integralmente as necessidades peculiares deste tipo de calibração.

Diferentes métodos vêm sendo testados para gerar sinais teoricamente conhecidos, sendo o tubo de choque considerado o sistema mais adequado quando se tem a necessidade de gerar um sinal degrau com grandes variações de amplitude e componentes de alta frequência [2].

Face ao exposto, este artigo analisa a resposta temporal de um sensor de pressão submetido a um sinal degrau gerado por um tubo de choque. O objetivo é estimar as incertezas dos parâmetros que qualificam o sensor dinamicamente, ou seja, o amortecimento e a frequência natural. Outros parâmetros foram estudados, como a sensibilidade, o tempo de pico e o *overshoot*. Trabalhou-se com amplitude de pressão de até 1 MPa e componentes de frequência de até 60 kHz. Como resultado observou-se que, utilizando a metodologia proposta é possível quantificar as incertezas dos parâmetros da função de transferência do sensor com um bom nível de confiabilidade. Os experimentos são realizados no Tubo de Choque do Laboratório Prof. Henry T. Nagamatsu, do Instituto de Estudos Avançados (IEAv), Brasil.

2. METODOLOGIA

O sistema utilizado no experimento é composto por um tubo de choque, sensores e sistema de aquisição e tratamento de dados. O tubo de choque contém duas seções: a seção *driver*, onde o ar fica armazenado, e a seção *driven*, onde acontece o degrau de pressão [3]. As seções são separadas por um diafragma, que se rompe a partir de um determinado nível de pressão permitindo a geração do sinal esperado.

Dois sensores colocados em posições diferentes na parede do tubo *driven*, servem para medir o tempo de trânsito da onda de choque que se desloca dentro do tubo. Outros dois sensores de pressão são usados para medir os níveis de pressão no interior do tubo *driver* (P_4) e no *driven* (P_1), além de um termômetro, que mede a temperatura (T_1) no interior do *driven*. O sensor a ser analisado localiza-se na parede lateral do tubo *driven*.

O procedimento de caracterização do sensor inicia-se ao gerar uma onda de choque cuja velocidade de sua frente será calculada pela diferença de tempo de passagem desta onda de choque pelos sensores colocados em posições distintas, a uma distância L ,

entre sí, na parede do tubo *driven*. A partir do cálculo da velocidade da frente de onda, V_s , da medição da pressão inicial, P_1 , da temperatura, T_1 , chega-se ao degrau de pressão gerado através da Equação (1) [1][3].

$$\Delta P = \frac{7}{6} P_1 \left[\left(\frac{V_s}{a} \right)^2 - 1 \right] \quad (1),$$

com $a = \sqrt{NRT}$, sendo N (calor específico) igual a 1,4; R (constante dos gases perfeitos), igual a 287 J/(kg.K); e T (temperatura) expresso em graus Kelvin [3].

Ao analisar o sistema proposto preocupa-se, sobretudo, com os seguintes fatores: a. o valor de P_1 antes do rompimento do diafragma; b. a influência da forma de rompimento do diafragma na onda de choque gerada; c. as relações do tubo de choque que definem o sinal de entrada do sensor. Para esta modelagem será utilizado o ar como fluido, assumindo-o como gás ideal. Tais fatores citados irão refletir na magnitude das incertezas relacionadas aos parâmetros de caracterização do sensor.

A função de transferência que irá relacionar os valores de entrada e saída do sensor é obtida partindo do modelo de equações diferenciais lineares de segunda ordem que representa o sensor. Aplicando a Transformada Laplace neste modelo de segunda ordem e considerando uma entrada do tipo degrau, tem-se a função de transferência do sensor de pressão, conforme Equação (2) [4].

$$X(s) = \frac{K\omega_n^2}{(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)s} \quad (2),$$

onde ω_n é a frequência natural não-amortecida e ζ é o amortecimento relativo e K é o ganho do sistema em regime estático.

Aplicando a Transformada Inversa de Laplace na Equação (2) tem-se a Equação (3) que representa a resposta temporal do sensor [4].

$$x(t) = K \left[1 - e^{-\zeta \omega_n t} \left(\cos \zeta \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} t + \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \cdot \text{sen} \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} t \right) \right] \quad (3)$$

Os parâmetros necessários para encontrar ζ e ω_n são o M_p (*overshoot*), que é o valor de saída medido que excede o valor estável do sinal; e o tempo de pico, t_p , que é o tempo onde ocorre M_p . As Equações (4) e (5) são usadas para encontrar os parâmetros estudados [4].

$$M_p = 100 e^{\frac{-\pi \zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}}}, \quad t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (4), (5)$$

3. RESULTADOS

Foram executados três ensaios nas mesmas condições iniciais, conforme especificadas na Tabela 1.

Tabela 1. Condições iniciais.

Parâmetros	Valor Médio
P ₄	3000 psi
P ₁	13.9 psi
T ₁	20 ° C
L	0,4 m

Fonte: Relatório 14XB-32. Adaptado. [5]

Através dos valores da Tabela 1, da medida do tempo de trânsito da onda de choque, t , e utilizando a Equação (1), calcula-se o valor de ΔP . Os resultados calculados para t , V_s e ΔP são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados calculados.

Parâmetro	Médias e incertezas	Incerteza relativa
t	47.30(0.28) x 10 ⁻⁵ s	0.6%
V_s	846 (5) m.s ⁻¹	0.6%
ΔP	82.6 (2.4) psi	2.9%

A sensibilidade do sensor em regime permanente, K , foi determinada pelo quociente entre o sinal degrau ΔP , em psi, por ΔV , em volt, sendo este obtido experimentalmente [6]. A partir desses valores, calculou-se o sinal de pressão experimental e suas incertezas, conforme Tabela 3. As incertezas combinadas das medições

8º Congresso Brasileiro de Metrologia, Bento Gonçalves/RS, 2015

relacionadas a K , ΔP e ΔV foram calculadas conforme a Lei de Propagação de Incertezas [7].

Tabela 3. Resultados calculados.

Parâmetro	Média e Incerteza	Incerteza relativa
ΔV	2.840 (0.019) V	0.7%
K	29.11 (0.06) V/psi	0.2%

Para estimar a resposta teórica do sensor consideram-se os parâmetros ζ e ω_n . Partindo-se dos valores experimentais de t_p e M_p , obtido nas três amostras, calculou-se suas médias e desvio padrão. Com esses valores foram realizadas simulações, pelo Método de Monte Carlo [8], para valores de M_p e t_p . Com o mesmo método, utilizando as Equações (4) e (5), encontrou-se os valores médios e incertezas associadas para os parâmetros ζ e de ω_n , conforme Tabela 4.

Tabela 4. Resultados experimentais e teóricos.

Parâmetro	Média e Incerteza	Incerteza relativa
M_p	27.1 (0.8) %	11.2%
t_p	1.1(6) x 10 ⁻⁵ s	12.1%
ζ	0.38 0 (8)	8.0%
ω_n	3 07 (17) x 10 ³ rad/s	12.8%

Com os parâmetros acima pode-se representar graficamente a resposta teórica do sistema e compará-la com a resposta experimental (Fig. 1). Na figura as linhas horizontais (verde), representam o sinal degrau ideal e suas incertezas. As linhas pontilhadas (vermelho), representam a resposta teórica e suas incertezas. As linhas contínuas (azul), representam a resposta experimental e suas incertezas de medição.

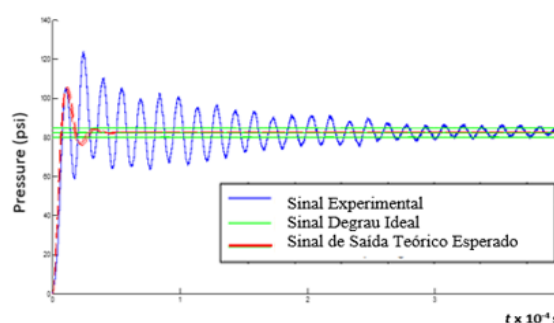


Fig. 1. Representação do sinal degrau ideal, respostas teórica e experimental e suas incertezas.

Analisando o sinal experimental da Figura 1, pode-se observar que o primeiro pico é inferior ao segundo e ao terceiro subsequentes. Isto leva a uma subestimação do M_p e uma superestimação de ζ . Assim, o sinal de saída teórico do sensor é rapidamente amortecido e, conseqüentemente, os coeficientes de amortecimento experimentais e teóricos não apresentam concordância entre si. Esta observação levou a outros estudos, que ainda estão sendo conduzidos, sobre outras formas de encontrar o coeficiente de amortecimento, como, por exemplo, utilizando dois ou mais picos consecutivos ao longo do amortecimento.

4. CONCLUSÃO

Este experimento foi proposto para analisar a resposta temporal de um sensor de pressão submetido a um sinal degrau e comparar suas respostas teóricas e experimentais, quantificando as incertezas da medição.

Inicialmente gerou-se um sinal degrau através de um tubo de choque e calculou-se os valores teóricos da resposta temporal do sensor. Posteriormente comparou-se estes resultados teóricos à resposta experimental do sensor.

As incertezas relacionadas aos valores do sinal degrau teórico e do sinal degrau experimental foram calculadas usando a Lei de Propagação de Incertezas [7]. As incertezas relacionadas aos parâmetros M_p e T_p , ζ e ω_n , foram calculadas pelo Método de Monte Carlo [8].

A análise proposta neste estudo fornece um meio para caracterizar o sensor para o uso em aplicações submetidas a uma grande variação de amplitude de pressão com altos componentes de frequência.

Outros estudos vem sendo realizados no sentido de investigar o efeito da vibração das paredes do tubo de choque e sua influência no tempo de amortecimento do sensor. É necessário também verificar a influência causada pelo rompimento do

diafragma no primeiro pico do sinal experimental, pois se acredita que estes efeitos podem ser sistemáticos e, se quantificado poderão aprimorar a metodologia proposta.

5. REFERÊNCIAS

- [1] ISA – 37.16.01-2002. ‘A Guide for the Dynamic Calibration of Pressure Transducers’. The Instrumentation, Systems and Automation Society. North Carolina. 2002.
- [2] Diniz, A. C. G. C., Vianna, J. N. S. e Neves, F.J.R. Calibração dinâmica de sensores de pressão: métodos e meios. Metrologia 2003, SBM (Congress), 01-05 Setembro, 2003, Recife, Brazil.
- [3] Anderson Jr., J., Modern Compressible Flow, with Historical Perspective, Mc Graw Hill, 3rd ed., 2003.
- [4] Ogata, Katsuhiko, Engenharia de Controle Moderno. 5 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.
- [5] Martos, João Felipe de Araújo. Investigação experimental do veículo hipersônico aeroespacial 14-X B. Dissertação de Mestrado. Orientador: Paulo Gilberto de Paula Toro. Co-Orientador: Israel da Silveira Rego. UFABC. 2014.
- [6] S. Downes, A. Knott, I. Robinson, Uncertainty estimation of shock tube pressure steps, in: XXI IMEKO World Congress “Measurement in Research and Industry”, Prague, Czech Republic, August 30-September 4, (2015) 1648-1651.
- [7] BIPM/JCGM 100, 2008, Evaluation of Measurement Data - Guide to the expression of uncertainty of measurement – Joint Committee for Guides in Metrology, BIPM, JCGM 100 (2008).
- [8] BIPM/JCGM 101:2008. Evaluation of Measurement Data - Supplement 1 to the Guide to the expression of uncertainty of measurement-Propagation of distributions using a Monte Carlo method”. Joint Committee for Guides in Metrology, BIPM, JCGM 101 (2008).