



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

ANÁLISE METROLÓGICA DA CALIBRAÇÃO DE TUBOS VENTURI UTILIZADOS NA MEDIÇÃO DE VAZÃO MÁSSICA DE "BLEED" EM AERONAVES

Ricardo Ferreira Arantes - ricardo.arantes@embraer.com.br^{1,2}
Ricardo Sutério - suterio@lit.inpe.br^{1,3}

¹ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, P. Mal. Eduardo Gomes, 50, CEP 12228-900, São José dos Campos - SP

²EMBRAER – Empresa Brasileira de Aeronáutica, Av. Brig. Faria Lima, 2170, CEP: 12227-901, São José dos Campos - SP

³INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Av. dos Astronautas, 1758, CEP: 12227-010, São José dos Campos - SP

***Resumo:** Medidores de vazão tipo Venturi são amplamente utilizados em indústrias aeronáuticas, devido ao fato de que são de construção simples, grande range de medição, apresenta menores perdas de carga e maior precisão quando comparado com outros medidores de vazão baseados na queda de pressão como, por exemplo, placas de orifícios. O trabalho consiste em realizar uma análise metrológica da calibração de tubos Venturi utilizados para medir vazão mássica de sangria de ar ("Bleed") de motores em aeronaves. Primeiramente, será apresentado o estado da arte para medição de vazão de ar e as vantagens/desvantagens da utilização de tubos Venturi quando comparado com alguns medidores de vazão de diferentes princípios de medição (perda de carga, coriolis, térmico, etc). Um modelo de Regressão linear será calculado utilizando a técnica dos mínimos Quadrados, e técnicas de diagnóstico de modelo de Regressão serão aplicadas com o intuito de identificar possíveis resíduos ou eventuais problemas nos dados e/ou modelo de regressão. O procedimento de calibração, as especificações dos instrumentos de medição utilizados e os dados da calibração serão apresentados juntamente com uma análise metrológica (Análise de Incerteza de Medição), a fim de evidenciar os resultados obtidos. As principais fontes de incertezas da calibração serão identificadas, ganhando assim um profundo conhecimento sobre o sistema de medição de vazão (tubo Venturi), que permitirá identificar eventuais pontos de melhorias na calibração e fabricação de novos tubos Venturi.*

***Palavras-chave:** Venturi, análise metrológica, vazão, calibração, bleed.*

1. INTRODUÇÃO

Medidores de vazão tipo Venturi são amplamente utilizados em indústrias aeronáuticas, devido ao fato de que são de construção simples, grande range de medição, apresenta menores perdas de carga e maior precisão quando comparado a outros medidores de vazão baseados na queda de pressão como, por exemplo, placas de orifícios. A medição de vazão com o uso do tubo Venturi torna-se relevante em aplicações onde não se deseja grandes perdas de carga, pois durante a medição o ar passa através de uma área restrita, conhecida como garganta, gerando uma queda de pressão e após isto ele escoar através de uma seção de saída recuperadora de pressão, onde aproximadamente 80 % da diferença de pressão gerada na garganta do tubo são recuperadas.

Muitas vezes em grandes indústrias, os tubos Venturi são projetados e fabricados para atender aos requisitos de projeto/aplicação. Nestes casos, ao invés de utilizar coeficientes e equações comerciais, as equações destes tubos Venturi são determinadas através de um processo de calibração, obtidas através de modelos de Regressão Linear. Neste trabalho, uma análise metrológica será realizada na calibração de um tubo Venturi fabricado, visando conhecer todo o sistema de medição utilizado na calibração do mesmo (Transdutores de pressão, termopar e medidor de vazão mássica), a fim de assegurar a confiabilidade dos resultados e propor eventuais melhorias no projeto deste experimento.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Medição de Vazão

Medição de vazão é um evento que está presente quase todos os dias em nossas vidas. Quando alguém está abastecendo seu carro em um posto de gasolina um medidor de vazão está sendo utilizado. Similarmente é também

difícil pensar em um setor de uma indústria na qual um medidor de vazão de um tipo ou outro não faz parte do processo.

Os sistemas de medição de vazão mássica são baseados em diversos princípios físicos e a maioria deles requer calibração e/ou correções empíricas. Os medidores de vazão por obstrução, ou seja, aqueles que utilizam o princípio da queda de pressão para a medição de vazão são os mais usuais na medição de vazão. Esta classe de medidores, onde o tubo Venturi faz parte, utilizam a medição de pressão diferencial e um fator de correção empírico para estimar a vazão. A placa de orifício, os bocais são outros exemplos desta classe de medidores - Tavoularis - 2006. A Tabela (1) mostra alguns tipos de medidores de vazão e suas características:

Tabela 1. Medidores de Vazão – Tavoularis (2006)

Medidor de Vazão Tipo	Rangeabilidade	Perda de carga	Incerteza	Custo
Deslocamento Positivo	10:1	Grande	+/-0,25% Leitura	Médio
Venturi	4:1	Baixa	+/-1% FS	Médio
Bocal	4:1	Média	+/-1-2% FS	Médio
Placa de orifício	4:1	Média	+/-2-4% FS	Baixo
Pitot	3:1	Muito Baixa	+/-3-5% FS	Baixo
Rotâmetro	10:1	Média	+/-0,5% Leitura	Baixo
Vortex	10:1	Média	+/-1% Leitura	Alto
Turbina	20:1	Alta	+/-1% Leitura	Alto
Ultrassônico	10:1	nenhuma	+/-5% Leitura	Alto
Eletromagnético	40:1	Nenhuma	+/-0,5% Leitura	Alto
Coriolis	10:1	Baixa	+/-0,4% FS	Alto
Térmico	10:1	Baixa	+/-1% FS	Alto

Observando a Tabela 1 pode-se notar o motivo da escolha do tubo Venturi para a medição de vazão em aeronaves, pois o mesmo apresenta uma pequena perda de carga juntamente com uma boa incerteza e um custo médio. E ainda pode ser facilmente fabricado na própria empresa e instalado diretamente nas aeronaves.

Neste trabalho, o padrão de vazão utilizado para a calibração do Venturi foi um medidor de vazão tipo Coriolis, o qual apresenta uma boa incerteza de medição de vazão. Deve-se destacar que apesar da simplicidade dos medidores por obstrução (Venturi, Bocal e placa de orifício), eles estão presentes em mais de 40% das medições de fluidos realizadas nas indústrias (Webster, 1999).

2.2. Análise do Processo de Medição

2.2.1. Mensurando

É a vazão mássica de ar fornecida e controlada pelo medidor de vazão mássica tipo Coriolis.

2.2.2. Procedimento do Ensaio de Calibração

O ambiente de ensaio consiste de uma fonte Pneumática com uma pressão máxima de 690 kPa, um aquecedor de ar (máximo de 300 °C ou 573 K), uma válvula reguladora de vazão, um medidor de vazão mássico tipo Coriolis (0 – 27 kg/min) e orifícios para simular a perda de carga de operação após o Venturi durante a calibração.

Foram estabelecidos sete pontos de medição para cada uma das três diferentes temperaturas do ar (24 °C ou 297 K; 182,4 °C ou 455 K e 257,4 °C ou 530 K respectivamente). Os parâmetros de temperatura, pressão de entrada e pressão diferencial foram medidos para cada valor de vazão regulada no medidor mássico. Os dados coletados nos Ensaio estão apresentados na Tabela 2.

2.2.3. Ambiente do Ensaio de Calibração

O ensaio foi realizado em ambiente laboratorial controlado de temperatura de (24,0 ± 2,0) °C e tensão elétrica estável.

2.2.4. Operador

O operador do ensaio de calibração exerce pouca influência no processo de medição, pois um sistema de aquisição de dados foi utilizado para gravar os dados do ensaio, o qual também fará parte da instrumentação da aeronave durante os ensaios em vôo, onde serão realizadas as medições de vazão de ar com o tubo venturi.

Tabela 2. Dados do Experimento

Ponto	Temperatura	Pressão de Entrada	Pressão Diferencial	Vazão Mássica
i	T (K)	P (kPa)	ΔP (kPa)	W (kg/min)
1	297,2	118,66	1,72	2,27
2	297,2	140,86	3,17	3,40
3	297,2	168,92	4,69	4,54
4	297,2	200,29	6,21	5,67
5	297,2	232,42	7,72	6,80
6	297,2	265,93	9,10	7,94
7	297,2	300,13	10,48	9,07
8	455,5	127,97	2,48	2,27
9	455,5	158,79	4,41	3,40
10	455,5	196,57	6,27	4,54
11	455,5	233,18	7,93	5,67
12	455,5	278,96	9,79	6,80
13	455,5	318,47	11,38	7,94
14	455,5	363,35	13,17	9,07
15	530,5	134,17	2,96	2,27
16	530,5	165,82	4,83	3,40
17	530,5	206,57	6,89	4,54
18	530,5	249,04	8,89	5,67
19	530,5	296,47	10,62	6,80
20	530,5	343,43	12,41	7,94
21	530,5	390,93	14,41	9,07

2.2.5. Sistema de Medição

O sistema de Medição, apresentado na Figura 1, é o próprio objeto da calibração, ou seja, o tubo Venturi. O diâmetro nominal de entrada do tubo Venturi é de 36,7 mm, diâmetro da garganta nominal de 25,4 mm e comprimento total de 170 mm. A entrada e a garganta do tubo Venturi possuem anéis piezométricos com quatro pórticos para medição de pressão estática. A temperatura do ar foi medida antes da entrada do tubo Venturi após estabilização adequada. Os dados medidos foram mostrados em um sistema de aquisição de dados.

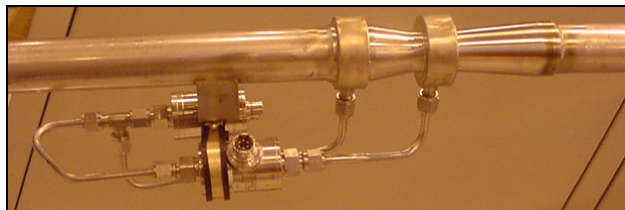


Figura 1: Tubo Venturi

O tubo Venturi é constituído dos seguintes instrumentos de medição:

- Transdutor de pressão absoluta (0 até 689,5 kPa);
- Transdutor de pressão diferencial (-34,5 até 34,5 kPa);
- Termopar tipo K (0 até 1300 °C);

2.3. Modelo Matemático

A seguinte equação da vazão mássica (W) pode ser utilizada para descrever a relação de um tubo Venturi:

$$W = K \cdot \sqrt{\frac{\Delta P \cdot P}{T}} \quad (1)$$

Onde:

W = Vazão mássica medida pelo Venturi (kg/min);

K = constante a ser definida experimentalmente;

ΔP = Pressão diferencial do Venturi (kPa);

P = Pressão absoluta de entrada (kPa);

T = Temperatura (K).

Podendo ser escrita na forma matricial, como:

$$\{y\} = [X] \{\beta\} + \{\varepsilon\} \quad (2)$$

Onde:

$$\{\beta\} = K$$

$$[X] = \sqrt{\frac{\Delta P_i \cdot P_i}{T_i}}$$

$$\{\varepsilon\} = y_i - \hat{y} \text{ (Resíduos do modelo ajustado)}$$

A fim de corrigir eventuais erros sistemáticos no modelo, optou-se pelo seguinte modelo matemático ajustado:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 \cdot x \quad (3)$$

Sendo:

$$\beta_1 = K ;$$

β_0 = Compensação de Erros Sistemáticos do experimento.

O Método dos Mínimos Quadrados foi utilizado para determinar os parâmetros da equação de regressão do modelo adotado, resultando no seguinte:

$$\hat{W} = -0,0886 + 2,822 \cdot \sqrt{\frac{\Delta P \cdot P}{T}} \quad (4)$$

A análise dos resíduos, o método de cálculo utilizado para encontrar o modelo de regressão linear, bem como o cálculo de incerteza experimental foram apresentados por Arantes e Sutério (2008), demonstrando que o modelo estatístico linear satisfaz os pressupostos iniciais de análise.

2.4. Método de cálculo e propagação de incerteza na calibração do tubo Venturi

2.4.1. Medição de pressão estática e diferencial

A medida de pressão estática absoluta e diferencial é obtida por transdutores de pressão conectados a um sistema de aquisição de dados. Os transdutores de pressão utilizados possuem um sinal de saída de 0 até 5 V. A sensibilidade dos transdutores de pressão estática e diferencial são respectivamente 20 psi/V e 2 psi/V, que representa no SI 137,9 kPa/V e 13,8 kPa/V.

2.4.2. Medição de Temperatura do ar

A medida de temperatura do ar foi obtida por um termopar tipo K conectado ao sistema de aquisição de dados. A medição é feita diretamente em graus Celsius pelo sistema de aquisição de dados e convertida para Kelvin no próprio sistema de aquisição de dados.

2.4.3. Medição de Vazão mássica de ar (Padrão)

A medida de vazão mássica de ar é obtida por um medidor de vazão tipo Coriolis com uma faixa de operação de 0 até 60 ppm, aproximadamente 27 kg/min e um sinal de saída de 4 até 20 mA. Para obter-se todos os dados simultaneamente, ou seja, na mesma base de tempo, o medidor também foi conectado ao sistema de aquisição de dados com uma sensibilidade de [3,125 (ppm/V) – 12,500] que representa no SI [1,417 (kg/min.V⁻¹) – 5,670].

2.4.4. Modelo de Cálculo de Incerteza da Calibração

Para o cálculo de propagação de incertezas todas as contribuições foram consideradas estaticamente independentes, assim a incerteza da vazão mássica medida pelo tubo Venturi foi obtida através da Eq. (4), adicionando-se uma

componente de incerteza oriunda da rastreabilidade devido a especificações / calibração do padrão de vazão mássica e uma componente oriunda do cálculo de incerteza experimental do modelo de regressão experimental, ou seja:

$$(u_w)^2 = \left(\frac{\partial W}{\partial \Delta P}\right)^2 (u_{\Delta P})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial P}\right)^2 (u_P)^2 + \dots$$

$$\left(\frac{\partial W}{\partial T}\right)^2 (u_T)^2 + (u_{W_Padr\tilde{a}o})^2 + (u_{Regress\tilde{a}o})^2 \quad (5)$$

Onde:

$$(u_{\Delta P})^2 = \left(\frac{\partial \Delta P}{\partial T_{DAQS}}\right)^2 (u_{T_{DAQS}})^2 + (u_{\Delta P1})^2 + (u_{\Delta P2})^2 + (u_{\Delta P3})^2 + (u_{\Delta P4})^2 + (u_{\Delta P5})^2 \quad (6)$$

$$(u_P)^2 = \left(\frac{\partial P}{\partial T_{DAQS}}\right)^2 (u_{T_{DAQS}})^2 + (u_{P1})^2 + (u_{P2})^2 + (u_{P3})^2 + (u_{P4})^2 + (u_{P5})^2 \quad (7)$$

$$(u_{T_{DAQS}})^2 = (u_{T1_{DAQS}})^2 + (u_{T2_{DAQS}})^2 + (u_{T3_{DAQS}})^2 + (u_{T4_{DAQS}})^2 \quad (8)$$

$$(u_T)^2 = (u_{Temp_{DAQS}})^2 + (u_{T1})^2 + (u_{T2})^2 \quad (9)$$

$$(u_{Temp_{DAQS}})^2 = (u_{Temp1_{DAQS}})^2 + (u_{Temp2_{DAQS}})^2 + (u_{Temp3_{DAQS}})^2 + (u_{Temp4_{DAQS}})^2 \quad (10)$$

$$(u_{W_Padr\tilde{a}o})^2 = \left(\frac{\partial W_{padr\tilde{a}o}}{\partial C_{DAQS}}\right)^2 (u_{C_{DAQS}})^2 + (u_{W1})^2 + (u_{W2})^2 + (u_{W3})^2 \quad (11)$$

$$(u_{C_{DAQS}})^2 = (u_{C1_{DAQS}})^2 + (u_{C2_{DAQS}})^2 + (u_{C3_{DAQS}})^2 + (u_{C4_{DAQS}})^2 \quad (12)$$

O termo relacionado à incerteza experimental foi obtido juntamente com o ajuste do modelo de regressão linear por Arantes e Suterio (2008). A Figura (2) é uma representação gráfica da incerteza experimental em kg/min do modelo de regressão em função da variável independente X.

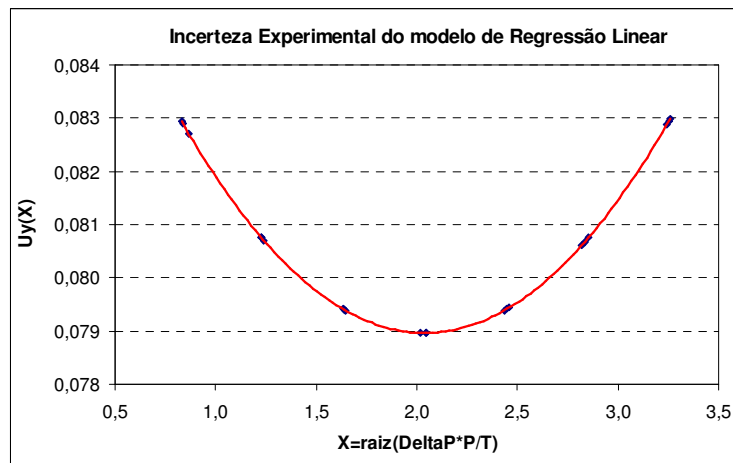


Figura 2: Incerteza Experimental do modelo de Regressão Linear calculada por Arantes e Suterio(2008)

O modelo de cálculo de Incerteza de calibração pode ser obtido substituindo primeiramente as Eq. (8), (10) e (12), nas Eq. (6), (7), (9) e (11) respectivamente, e posteriormente estas equações na Eq. (5). Desta forma a incerteza de vazão mássica do Venturi pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 (u_w)^2 &= \left(\frac{\partial W}{\partial \Delta P}\right)^2 \left(\frac{\partial \Delta P}{\partial T_{DAQS}}\right)^2 (u_{T1_{DAQS}})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial \Delta P}\right)^2 \left(\frac{\partial \Delta P}{\partial T_{DAQS}}\right)^2 (u_{T2_{DAQS}})^2 + \dots \\
 &\left(\frac{\partial W}{\partial \Delta P}\right)^2 \left(\frac{\partial \Delta P}{\partial T_{DAQS}}\right)^2 (u_{T3_{DAQS}})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial \Delta P}\right)^2 \left(\frac{\partial \Delta P}{\partial T_{DAQS}}\right)^2 (u_{T4_{DAQS}})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial \Delta P}\right)^2 (u_{\Delta P1})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial \Delta P}\right)^2 (u_{\Delta P2})^2 + \dots \\
 &\left(\frac{\partial W}{\partial \Delta P}\right)^2 (u_{\Delta P3})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial \Delta P}\right)^2 (u_{\Delta P4})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial \Delta P}\right)^2 (u_{\Delta P5})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial P}\right)^2 \left(\frac{\partial P}{\partial T_{DAQS}}\right)^2 (u_{T1_{DAQS}})^2 + \dots \\
 &\left(\frac{\partial W}{\partial P}\right)^2 \left(\frac{\partial P}{\partial T_{DAQS}}\right)^2 (u_{T2_{DAQS}})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial P}\right)^2 \left(\frac{\partial P}{\partial T_{DAQS}}\right)^2 (u_{T3_{DAQS}})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial P}\right)^2 \left(\frac{\partial P}{\partial T_{DAQS}}\right)^2 (u_{T4_{DAQS}})^2 + \dots \\
 &\left(\frac{\partial W}{\partial P}\right)^2 (u_{P1})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial P}\right)^2 (u_{P2})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial P}\right)^2 (u_{P3})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial P}\right)^2 (u_{P4})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial P}\right)^2 (u_{P5})^2 + \dots \\
 &\left(\frac{\partial W}{\partial T}\right)^2 (u_{Temp1_{DAQS}})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial T}\right)^2 (u_{Temp2_{DAQS}})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial T}\right)^2 (u_{Temp3_{DAQS}})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial T}\right)^2 (u_{T1})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial T}\right)^2 (u_{T2})^2 + \dots \\
 &\left(\frac{\partial W - \text{padrão}}{\partial C_{DAQS}}\right)^2 (u_{C1_{DAQS}})^2 + \left(\frac{\partial W - \text{padrão}}{\partial C_{DAQS}}\right)^2 (u_{C2_{DAQS}})^2 + \left(\frac{\partial W - \text{padrão}}{\partial C_{DAQS}}\right)^2 (u_{C3_{DAQS}})^2 + \dots \\
 &\left(\frac{\partial W - \text{padrão}}{\partial C_{DAQS}}\right)^2 (u_{C4_{DAQS}})^2 + (u_{W1})^2 + (u_{W2})^2 + (u_{W3})^2 + (u_{Regressão})^2
 \end{aligned} \tag{13}$$

Os coeficientes de sensibilidade, bem como os termos relativos às contribuições de incertezas inseridos na eq. (13) estão definidos a seguir:

- (u_w) = Incerteza combinada da calibração (Vazão Mássica);
- $\left(\frac{\partial W}{\partial \Delta P}\right)$ = Sensibilidade da vazão mássica pela pressão diferencial;
- $\left(\frac{\partial \Delta P}{\partial T_{DAQS}}\right)$ = Sensibilidade da pressão diferencial pela tensão lida no Sistema de aquisição de dados;
- $\left(\frac{\partial W}{\partial P}\right)$ = Sensibilidade da vazão mássica pela pressão estática absoluta;
- $\left(\frac{\partial P}{\partial T_{DAQS}}\right)$ = Sensibilidade da pressão diferencial pela tensão lida no Sistema de aquisição de dados;
- $\left(\frac{\partial W}{\partial T}\right)$ = Sensibilidade da vazão mássica pela temperatura;
- $\left(\frac{\partial W - \text{padrão}}{\partial C_{DAQS}}\right)$ = Sensibilidade da vazão mássica fornecida pelo medidor mássico padrão pela corrente lida no sistema de aquisição de dados;
- $\Delta P1$ = Rastreabilidade do Transdutor de Pressão diferencial;
- $\Delta P2$ = Classe de Exatidão do Transdutor Pressão diferencial;
- $\Delta P3$ = Estabilidade Térmica do Transdutor Pressão diferencial;
- $\Delta P4$ = Resolução do Transdutor de Pressão diferencial;
- $\Delta P5$ = Linearidade / Histerese / Repetitividade do Transdutor Pressão diferencial
- $P1$ = Rastreabilidade do Transdutor Pressão Absoluta;
- $P2$ = Classe Exatidão do Transdutor Pressão Absoluta;

$P3$	= Estabilidade Térmica Transdutor. Pressão Absoluta
$P4$	= Resolução do Transdutor Pressão Absoluta
$P5$	= Linearidade / Histerese / Repetitividade do Transdutor Pressão Absoluta
$T1_{DAQS}$	= Rastreabilidade da placa de tensão;
$T2_{DAQS}$	= Classe de Exatidão da placa de tensão;
$T3_{DAQS}$	= Linearidade da Placa de tensão;
$T4_{DAQS}$	= Estabilidade térmica da placa de tensão;
$T1$	= Rastreabilidade do Termopar
$T2$	= Classe de Exatidão do Termopar
$Temp1_{DAQS}$	= Rastreabilidade da placa de temperatura
$Temp2_{DAQS}$	= Classe de Exatidão da placa de temperatura
$Temp3_{DAQS}$	= Linearidade da Placa de temperatura
$W1$	= Rastreabilidade do Padrão de Vazão Mássica
$W2$	= Classe de Exatidão Padrão de Vazão Mássica
$W3$	= Repetitividade do padrão de Vazão Mássica
$C1_{DAQS}$	= Rastreabilidade da placa de corrente
$C2_{DAQS}$	= Classe de Exatidão da placa de corrente
$C3_{DAQS}$	= Linearidade da Placa de corrente
$C4_{DAQS}$	= Estabilidade térmica da placa de corrente
Exp	= Incerteza da Regressão Linear

2.4.5. Contribuições da Incerteza de Calibração

Com o intuito de identificar potenciais fontes de Incertezas, as mesmas foram agrupadas da seguinte forma:

- Pressão Diferencial;
- Pressão Absoluta;
- Temperatura;
- Aquisição de Dados;
- Padrão;
- Experimental.

A Figura 3 é uma representação esquemática das contribuições de Incerteza consideradas na calibração do tubo Venturi.

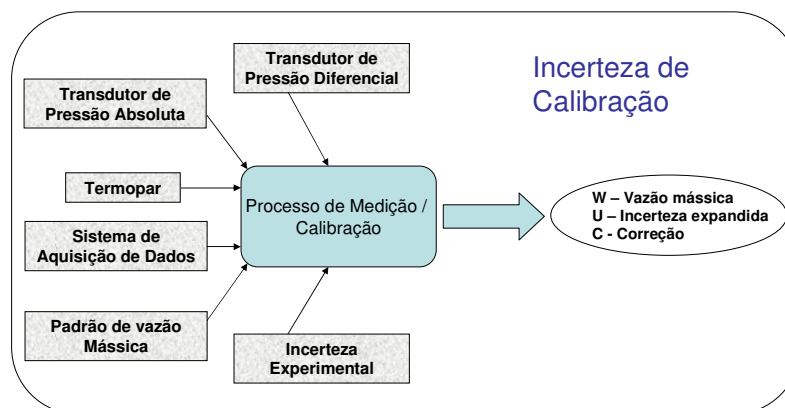


Figura. 3: Fontes de Incertezas na Calibração do Venturi

Com as contribuições de incertezas identificadas, a Eq. (13) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 (u_W)^2 = & \\
 & \text{(Contribuições do Transdutor de Pressão Diferencial)} \\
 & \left(\frac{\partial W}{\partial \Delta P}\right)^2 (u_{\Delta P1})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial \Delta P}\right)^2 (u_{\Delta P2})^2 + \dots \\
 & \left(\frac{\partial W}{\partial \Delta P}\right)^2 (u_{\Delta P3})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial \Delta P}\right)^2 (u_{\Delta P4})^2 + \dots \\
 & \left(\frac{\partial W}{\partial \Delta P}\right)^2 (u_{\Delta P5})^2 + \dots \\
 & \text{(Contribuições do Transdutor de Pressão Absoluta)} \\
 & \left(\frac{\partial W}{\partial P}\right)^2 (u_{P1})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial P}\right)^2 (u_{P2})^2 + \dots \\
 & \left(\frac{\partial W}{\partial P}\right)^2 (u_{P3})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial P}\right)^2 (u_{P4})^2 + \dots \\
 & \left(\frac{\partial W}{\partial P}\right)^2 (u_{P5})^2 + \dots \\
 & \text{(Contribuições do Termopar)} \\
 & \left(\frac{\partial W}{\partial T}\right)^2 (u_{T1})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial T}\right)^2 (u_{T2})^2 + \dots \\
 & \text{(Contribuições do Sistema de Aquisição de dados)} \\
 & \left(\frac{\partial W}{\partial \Delta P}\right)^2 \left(\frac{\partial \Delta P}{\partial T_{DAQS}}\right)^2 (u_{T1_{DAQS}})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial \Delta P}\right)^2 \left(\frac{\partial \Delta P}{\partial T_{DAQS}}\right)^2 (u_{T2_{DAQS}})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial \Delta P}\right)^2 \left(\frac{\partial \Delta P}{\partial T_{DAQS}}\right)^2 (u_{T3_{DAQS}})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial \Delta P}\right)^2 \left(\frac{\partial \Delta P}{\partial T_{DAQS}}\right)^2 (u_{T4_{DAQS}})^2 + \dots \\
 & \left(\frac{\partial W}{\partial \Delta P}\right)^2 \left(\frac{\partial P}{\partial T_{DAQS}}\right)^2 (u_{T1_{DAQS}})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial \Delta P}\right)^2 \left(\frac{\partial P}{\partial T_{DAQS}}\right)^2 (u_{T2_{DAQS}})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial \Delta P}\right)^2 \left(\frac{\partial P}{\partial T_{DAQS}}\right)^2 (u_{T3_{DAQS}})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial \Delta P}\right)^2 \left(\frac{\partial P}{\partial T_{DAQS}}\right)^2 (u_{T4_{DAQS}})^2 + \dots \\
 & \left(\frac{\partial W}{\partial T}\right)^2 (u_{Temp1_{DAQS}})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial T}\right)^2 (u_{Temp2_{DAQS}})^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial T}\right)^2 (u_{Temp3_{DAQS}})^2 + \dots \\
 & \left(\frac{\partial W_{-padr\~ao}}{\partial C_{DAQS}}\right)^2 (u_{C1_{DAQS}})^2 + \left(\frac{\partial W_{-padr\~ao}}{\partial C_{DAQS}}\right)^2 (u_{C2_{DAQS}})^2 + \dots \\
 & \left(\frac{\partial W_{-padr\~ao}}{\partial C_{DAQS}}\right)^2 (u_{C3_{DAQS}})^2 + \left(\frac{\partial W_{-padr\~ao}}{\partial C_{DAQS}}\right)^2 (u_{C4_{DAQS}})^2 + \dots \\
 & \text{(Contribuições do Padrão)} \\
 & (u_{W1})^2 + (u_{W2})^2 + (u_{W3})^2 + \dots \\
 & \text{(Contribuições do Experimento)} \\
 & (u_{Exp})^2
 \end{aligned} \tag{14}$$

2.4.6. Incertezas da Calibração

A Figura 4 mostra as contribuições médias de cada fonte de Incerteza na Incerteza Final da Calibração para todos os pontos de vazão mássica.

Contribuição média das Fontes de Incertezas

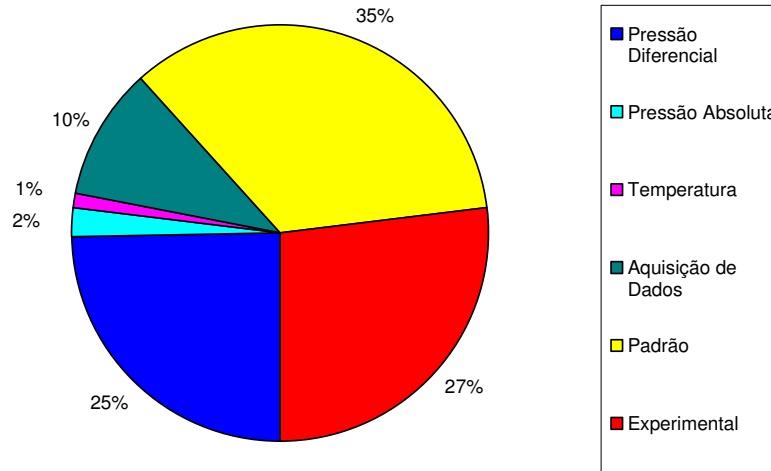


Figura 4: Contribuições de Incertezas na Calibração do Venturi

A incerteza padrão foi calculada através da Eq. (14) e os resultados da calibração estão representados na tabela abaixo:

Tabela 3. Resultados da Calibração

VVC Valor Verdadeiro Convencional (kg/min)	MI Média das Indicações (kg/min)	Td Tendência (kg/min)	k Fator de Abrangência (-)	U95 Incerteza Expandida (kg/min)	U95 Incerteza Expandida Relativa (%)
2,27	2,29	0,02	2,01	0,16	7,2
3,40	3,39	-0,02	2,01	0,16	4,6
4,54	4,54	0,00	2,01	0,15	3,4
5,67	5,65	-0,02	2,01	0,15	2,7
6,80	6,82	0,01	2,01	0,15	2,2
7,94	7,91	-0,02	2,01	0,15	1,9
9,07	9,09	0,01	2,01	0,16	1,8

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2.01$, o qual para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos $v_{eff} = 290$, corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95,45%.

2.4.7. Discussão

Após a análise Metrológica da calibração do tubo Venturi foi possível identificar rapidamente potenciais ganhos para redução da incerteza de calibração. Realizando apenas a troca do transdutor de pressão diferencial por outro com melhor exatidão, e já disponível no laboratório de calibração, certamente será possível obter uma melhoria de aproximadamente 15% nos valores de Incertezas da calibração. Para as próximas calibrações pretende-se utilizar outro medidor mássico como padrão, pois o mesmo contribuiu com aproximadamente 35% da Incerteza final da calibração. Convém ressaltar que a mesma instrumentação utilizada na calibração foi utilizada para os ensaios em vô, inclusive o sistema de aquisição de dados.

3. CONCLUSÃO

A análise metrológica da calibração do tubo Venturi possibilitou a identificação das fontes de incertezas que mais contribuíram na incerteza final de calibração do Venturi.

As fontes de incertezas relacionadas ao Padrão, ao ajuste da Regressão linear (Experimental) e ao transdutor de pressão diferencial, foram responsáveis por 87% da Incerteza final da calibração e individualmente cada uma com 35%, 27% e 25%, respectivamente.

Este estudo mostrou a importância da escolha da instrumentação adequada para a medição, e identificou os potenciais ganhos para diminuir a incerteza da calibração. Para as próximas calibrações pretende-se obter uma incerteza de calibração 25% menor, melhorando assim a confiabilidade dos dados medidos durante o voo da aeronave.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Empresa Brasileira de Aeronáutica por ter cedido os seus Laboratórios para a realização dos experimentos.

5. REFERÊNCIAS

- ABNT NBR ISO 5167-1, 1994, “Medição de Vazão de Fluidos por Meio de Instrumentos de Pressão - Parte 1: Placas de Orifício, Bocais e Tubos de Venturi Instalados em Seção Transversal Circular de Conduitos Forçados”, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Brasil.
- ARANTES, R. F. e SUTERIO, R., 2008, “Análise estatística em modelos de regressão linear aplicados a medições de tubos Venturi” – I CIMMEC, Rio de Janeiro.
- ASME PTC 19.5-2004, 2004, “Flow Measurement – Performance Test Codes”, The American Society of Mechanical Engineering, New York.
- Edição Brasileira do EA-4-02/S1: Suplemento 1 ao Guia EA-4/02, 1999, “Expressão da incerteza de medição na calibração (Exemplos)”, Gráfica Editora Stamppla Ltda., Rio de Janeiro.
- MONTGOMERY, D. C., 2001, “Design and Analysis of Experiments”, 5th edition, John Wiley and Sons.
- SWEARINGEN, C., 1999, “Selecting the Right Flowmeter - Part 1”, edition of Chemical Engineering Magazine: Choosing the Best Flowmeter.
- TAVOULARIS, S., 2006, “Measurement in Fluid Mechanics”, Cambridge University Press.
- VIM, 2000, "Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia" - INMETRO, segunda edição, Brasília.
- WEBSTER, J. G., 1999, “The Measurement, Instrumentation and Sensors – Handbook”, A CRC Handbook Published in Cooperation with IEEE Press, USA.

6. DIREITOS AUTORAIS

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

METROLOGICAL ANALYSIS OF A VENTURI TUBE CALIBRATION USED ON MASS FLOW MEASUREMENTS OF BLEED IN AIRCRAFTS

Ricardo Ferreira Arantes,- ricardo.arantes@embraer.com.br^{1,2}

Ricardo Suterio - suterio@lit.inpe.br^{1,3}

¹ITA – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, P. Mal. Eduardo Gomes, 50, CEP: 12228-900, São José dos Campos - SP

²EMBRAER – Empresa Brasileira de Aeronáutica, Av. Brig. Faria Lima, 2170, CEP: 12227-090, São José dos Campos - SP

³INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Av. dos Astronautas, 1758, CEP: 12227-010, São José dos Campos - SP

Abstract. Venturi tube Flow meters are widely used in aeronautics companies, because of its simple built, large rangeability and present lower pressure drop and higher precision when compared to other flow meters based on pressure drop as, for example, orifice plates. The paper consist of performing an metrological analysis of Venturi Tubes calibration used to measure air mass flow rate bleed from aircrafts engines, usually known as “Bleed”. First of all, will be presented the state of the art in air flow measurement and the advantages/disadvantages of the Venturi Tube, when compared to some flow meters of different measurements principles (Pressure drop, Coriolis, thermal, etc). A linear regression model will be calculated using the least squares method; and diagnostic techniques of regression model will be applied with the purpose of identifying possible residuals or eventual problems on data and/or regression model. The calibration procedure, the instrumentation specifications and the calibration data will be presented jointly with a metrological analysis (Measurements uncertainty analysis), in order to evidence the results obtained. The main sources of calibration uncertainty will be identified, gaining in this way a deeply knowledge about the flow measurement system (Venturi tube), that will allow identifying eventual improving points in the calibration.

Keywords: Venturi, Metrological analysis, flow, calibration, bleed.