



AVALIAÇÃO DAS INCERTEZAS NA CALIBRAÇÃO DE UM MEDIDOR DE CONSUMO DE AR PARA UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

F. P. SOTO*
sotopauf@hotmail.com

J. A. SILVA**
jant@funrei.br

A. M. SANTOS*
asantos@sc.usp.br

A. G. SANCHES**
alexsanches@hotmail.com

Resumo: O caráter experimental de um trabalho científico e os resultados obtidos podem ser objeto de questionamento no tocante ao grau de incerteza proveniente dos instrumentos de medição envolvidos nos ensaios. O trabalho desenvolvido trata da aplicação de uma metodologia para o cálculo do fluxo de ar medido por um bocal, construído para medir o consumo de ar de um motor de combustão interna (MCI), levando em consideração as incertezas sistemáticas (tipo B) e aleatórias (tipo A) do processo de medição. O bocal foi calibrado por uma placa de orifício instalada em uma bancada onde foi monitorada a temperatura da cabine de ensaio, temperatura do fluxo de ar, variação da pressão antes e depois da placa, pressão atmosférica local e pressão estática no tubo. Neste caso, comprovou-se que as incertezas sistemáticas (tipo B) puderam ser desconsideradas, entretanto, foi necessário seu cálculo para tomar esta decisão. Decisão baseada na comparação com a incerteza padrão estimada pela aplicação do método dos mínimos quadrados.

1. INTRODUÇÃO

A análise de incerteza é objeto de uma vasta bibliografia, quer seja especializada ou não. Todo trabalho experimental, com rigor científico, precisa deste cálculo e mais ainda, quando são construídos equipamentos para a medição de diferentes parâmetros. Por exemplo, a medição do consumo de ar em MCI.

Medir consumo de ar em MCI com exatidão apresenta dois problemas a resolver: a resistência ao fluxo de ar causado pelo equipamento de medição, que diminui o rendimento volumétrico e as pulsações da pressão características na aspiração dos motores alternativos.

Para resolver o primeiro problema, utilizou-se bocal da série TECNER TG, ISO 5167-1980 [1]. Estes bocais abertos são instrumentos concebidos para a medição de consumo de ar e gases, tanto em condutos como em instalações abertas. São instrumentos estáveis. A leitura é baseada na depressão produzida pela aceleração do fluxo e não pelas perdas de cargas. Sua aplicação mais vantajosa é, portanto, em medições onde a perda de carga pode produzir perturbações ao funcionamento do sistema, como é o caso dos MCI. O segundo problema é solucionado com a instalação de uma câmara de estabilização na admissão, para eliminar as pulsações de pressão características na aspiração dos motores alternativos.

O consumo de ar em um MCI depende entre outras variáveis da cilindrada do motor, porém, para cada cilindrada deve-se escolher um bocal a ser construído, logo esse bocal deve ser calibrado. Este será o assunto a ser tratado neste artigo; aplicar uma metodologia de cálculo da incerteza no processo de calibração dos bocais da série TECNER TG.

* Escola de Engenharia de São Carlos - USP. Av. Trabalhador São-carlense N 400, São Carlos, São Paulo. Brasil. Tel: (55)(16) 273 9414, FAX: (55)(16) 273 9402.

** Universidade Federal de São João Del Rey.- UFSJ. Pça. Frei Orlando, 170, São João Del Rey, Minas Gerais. Brasil. Tel: (55)(32) 3379 2617 - 2619

METODOLOGIA PARA CÁLCULO DA INCERTEZA

MOFFAT J. R., [2] apresentou um trabalho sobre o cálculo e análise da incerteza de resultados experimentais. Segundo este autor, considerando uma variável x_i com sua correspondente incerteza δx_i , a forma de representar esta variável e a incerteza é:

$$x_i = x_i(\text{medida}) \pm \delta x_i \quad (20:1) \quad (1)$$

A partir desta equação pode-se interpretar que: a melhor estimativa de x_i é x_i (*medido*). Existe uma incerteza em x_i que pode ser tão grande quanto δx_i . As diferenças de x_i com relação à incerteza $\pm \delta x_i$ são tão grandes quanto 20 para 1.

O valor de x_i (*medido*) representa uma observação para um experimento de amostra simples (só uma medição) ou a média de um conjunto de observações n de um experimento de amostra múltipla (n medições).

O valor de δx_i representa $1,96\sigma$ para a análise de uma amostra simples onde σ é o desvio padrão de uma população de possíveis valores à qual a amostra simples x_i pertence. Para um experimento de amostra múltipla δx_i pode ter três significados. Ele pode representar:

$$t_{S_{(n-1)}} / \sqrt{n} \quad (2)$$

como estimativa dos componentes dos erros, onde $S_{(n-1)}$ é o desvio padrão de um conjunto de n observações utilizados para calcular o valor médio \bar{x}_i e t é o valor estatístico “ t de Student” apropriado para n medições e um nível de confiança desejado. Pode-se representar a tendência limite para os erros fixos (esta interpretação implicitamente requer que a tendência limite seja estimada como as diferenças de 20 para 1). Finalmente, δx_i poderia representar $U_{.95}$ a incerteza total em x_i . O valor t é um número sempre maior que 1,96 para um nível de confiança de 95%, que permite o uso de $S_{(n-1)}$ no lugar de s na estimativa da incerteza da média de um conjunto.

A representação de um resultado R , num experimento assumido para ser calculado a partir de um conjunto de medições usando um programa de interpretação de dados (seja à mão ou por computador), é:

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_N) \quad (3)$$

O objetivo é expressar a incerteza no resultado calculado com a mesma probabilidade com que foi usada na estimativa das incertezas nas medições. KLINE e McCLINTOCK apud MOFFAT J. R. em [3], demonstraram nos resultados computados, que podem ser estimados com boa precisão usando a combinação da raiz da soma dos quadrados (RSS) dos efeitos de cada indivíduo de entrada e que a operação RSS preserva a mesma probabilidade.

O efeito da incerteza em uma única medição sobre o resultado calculado pode ser:

$$\delta R_x = \frac{\partial R}{\partial x_i} \delta x_i \quad (4)$$

A derivada parcial de R com respeito a x_i é o coeficiente de sensibilidade para o resultado de R com respeito à variável x_i . Quando várias variáveis independentes são usadas na função R , todos os termos são combinados pela RSS:

$$RSS = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial R}{\partial x_i} \delta x_i \right)^2} \quad (5)$$

Esta é a equação básica da análise da incerteza. Cada termo representa a contribuição feita pela incerteza em cada variável δx_i na incerteza total do resultado RSS. Cada termo tem a mesma forma da derivada parcial de R com respeito a x_i multiplicado pelo intervalo de incerteza de cada variável. A

incerteza estimada no resultado tem a mesma probabilidade de conter o valor verdadeiro do resultado como as incertezas das variáveis individuais têm de conter os valores verdadeiros [2].

A equação (1) aplica-se na equação (5), onde cada variável é independente e são feitas repetidas observações de cada variável. Aplica-se uma distribuição Gaussiana onde a incerteza em cada variável é inicialmente expressa com a mesma probabilidade.

Um programa de interpretação desses dados pode ser bastante simples, onde todas as derivadas parciais possam ser avaliadas analiticamente ou podem ser tão complexas que requerem diretamente uma análise por computador. O procedimento é o mesmo para os dois casos.

Em muitas situações a incerteza total em um resultado dado é dominada por poucos termos. Os termos na equação da incerteza que são menores que 1/3 do maior termo, podem ser geralmente desprezados. Existem exceções, onde existem muitos termos do mesmo tamanho [2].

Quando R é calculado usando um programa de computador em grande escala, ou envolvendo operações que são de difícil diferenciação, as operações representadas pelas equações (4) e (5), são muito trabalhosas para serem feitas à mão. Em muitos casos não é prático fazer um programa computacional separado para a avaliação da incerteza. Para estes experimentos complexos, o próprio programa de interpretação de dados pode ser usado para gerar a análise da incerteza, perturbando seqüencialmente os valores de entrada e acumulando a contribuição da incerteza individualmente.

Esta análise de incerteza executada diretamente por computador pode ser efetuada pela perturbação seqüencial de entrada, de acordo com o seguinte procedimento:

1. Calcular o resultado R para os dados registrados. Identificar este valor como R_o
2. Para $i=1$ até n , onde n é o número de variáveis em R : incrementar o valor da i th variável x_i com o intervalo de incerteza δx_i e calcular o resultado R_{i+} , usando o valor aumentado da i th variável com o valor registrado (nominal) das restantes variáveis. Calcular a diferença $R_{i+} - R_o$ e armazenar este como C_{i+} , que é a contribuição da incerteza para R causada pela i th variável, assumindo um desvio positivo. Se o resultado R segue uma função não linear de x_i tendo em consideração o tamanho de seu intervalo de incerteza, então calculamos C_{i-} usando $R_{i-} - R_o$. Então será calculado o valor:

$$C_i = \frac{|C_{i+}| + |C_{i-}|}{2} \quad (6)$$

3. A incerteza no resultado será a RSS de C_i .

A principal vantagem deste método é que o mesmo programa de interpretação de dados é utilizado na contribuição da incerteza. Porém, a cada momento o programa é modificado, e as modificações são automaticamente incorporadas no cálculo das incertezas.

Em muitos experimentos podemos ter duas ou mais variáveis relacionadas entre si associadas às unidades experimentais. Em geral, o objetivo principal é determinar: se as variáveis estão relacionadas entre si, qual é a forma deste relacionamento e se uma variável de interesse pode ser prevista a partir das observações das outras variáveis ACHCAR [4].

PROCEDIMENTO PARA A CALIBRAÇÃO DOS BOCAIS E CÁLCULO DA INCERTEZA

Aplica-se a seguir a metodologia explicada, para o cálculo da incerteza no processo de calibração dos bocais da série TECNER TG. Construiu-se uma instalação para a calibração dos bocais, onde todo o fluxo de ar do bocal passa também pela placa de orifício, Fig. 1. Através de uma válvula borboleta e um variador de frequência do motor do ventilador, conseguiu-se variar a vazão de ar no sistema. Mediu-se com o manômetro vertical de coluna de água, a diferença de pressão na placa de orifício ΔP_{po} Fig. 2, em mm de coluna de água (mmca). Para cada valor de ΔP_{po} existe um correspondente valor de pressão medido no bocal Fig. 2 através de um manômetro de coluna inclinada de água (Pmmcia).

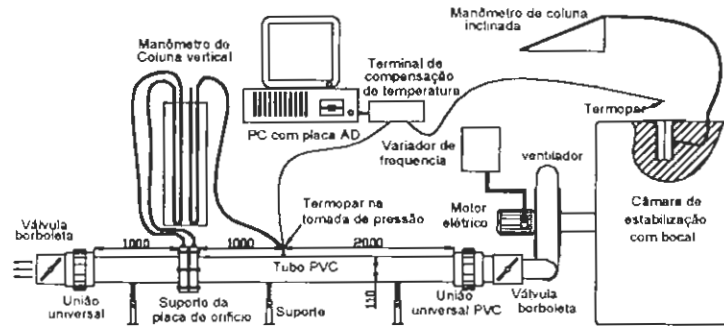


Fig. 1. Sistema de calibração do bocal para medida de consumo de ar, usando placa de orifício.

Com estes valores de ΔP_{po} para cada ensaio, e os correspondentes valores de temperatura T_{ar} em $^{\circ}\text{C}$ e pressão estática P_{ar} em mmca medidos no tubo, (a um metro da placa de orifício), a temperatura ambiente T_{amb} em $^{\circ}\text{C}$ e a pressão atmosférica P_{amb} em mmHg, foram usados para calcular o fluxo de ar. A foto 1 mostra a instalação e a montagem dos componentes usados na bancada de ensaio.

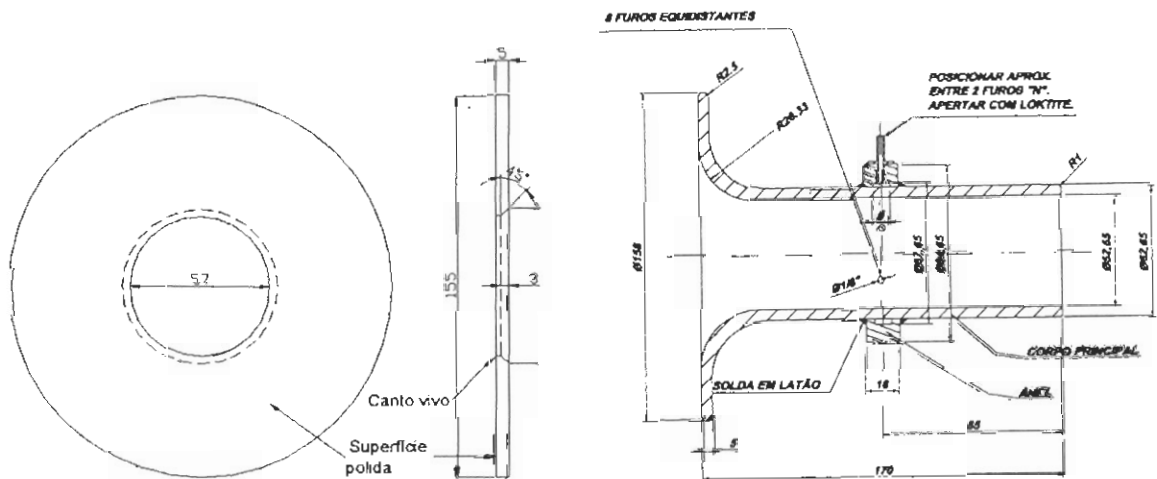


Fig. 2. Desenhos da placa de orifício e do bocal com suas dimensões características.



Foto 1. Foto da bancada onde se ressaltam o tubo PVC, a válvula borboleta, o suporte da placa de orifício, ventilador e os suportes do tubo PVC.

Seguindo o modelo proposto por [2], onde para experimentos complexos, o próprio programa de interpretação de dados pode ser usado para gerar a análise da incerteza, avaliando seqüencialmente os

valores de entrada e acumulando a contribuição da incerteza individualmente. Este estudo foi feito através de um programa em LabVIEW.

Na Fig. 3, 4 e 5 mostram-se as telas fundamentais deste programa onde evidenciam-se o procedimento e o algoritmo utilizado para o cálculo do fluxo que passa pelo bocal (descarga instantânea. (kg/h) e vazão instantânea. (m³/min)).

Fig. 3. Tela de diagrama de cálculo de: correcção da pressão manométrica em função da temperatura da cabine, densidade e viscosidade do ar.

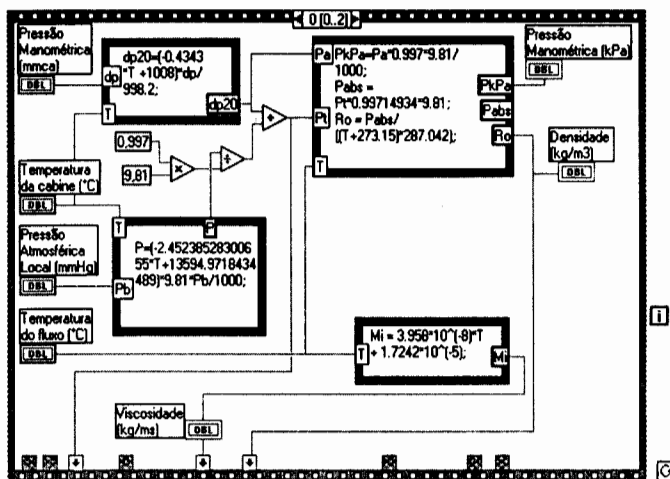


Fig. 4. Tela de diagrama de cálculo do coeficiente de expansão do ar (e), β e k_o .

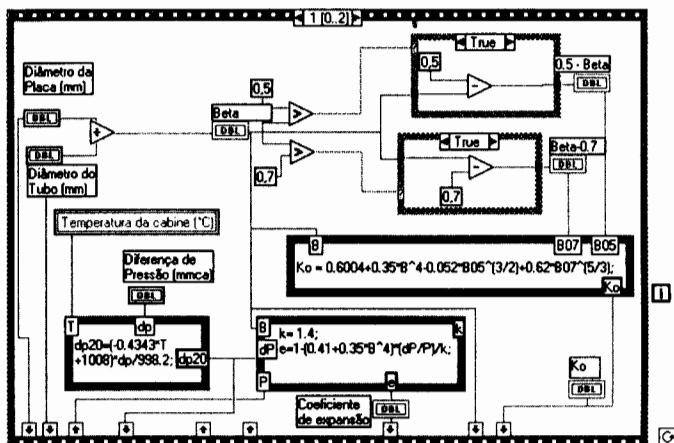
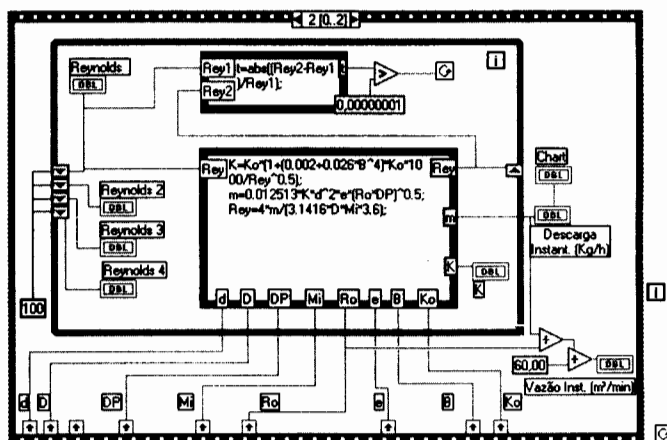


Fig. 5. Tela de diagrama de cálculo da descarga instantânea (kg/h) e vazão instantânea em (m³/min.).



Nesse estágio (Fig. 3), corrige-se a pressão manométrica em função da temperatura da cabine, tendo como temperatura de referência 20 °C. Calcula-se a pressão atmosférica obtida em mmHg (leitura do barômetro) em função da temperatura da cabine, obtendo-se uma pressão atmosférica em P_a . Calcula-se a pressão absoluta, com essa pressão calcula-se a densidade do ar em função da temperatura do fluxo, e finalmente calcula-se a viscosidade do ar em função da temperatura do fluxo. As equações usadas para essa etapa serão detalhadas a seguir. PAGLIUSO [5], seguindo procedimento da ASME [6], recomenda a correção da diferença de pressão medida na placa pela seguinte equação:

$$dp_{20} = (-0,4343 * T + 1008) * \frac{dp}{998,2} \quad (7)$$

onde: dp_{20} é a diferença de pressão corrigida para a temperatura de vinte graus, T a temperatura da cabine, dp a diferença de pressão medida na placa de orifício e $(-0,4343 * T + 1008)$ a correção da densidade da água para temperaturas entre 20 a 80°C.

A correção da pressão atmosférica medida pelo barômetro é dada pelo fabricante em (8).

$$P = (-2,4523 * T + 13594,97) * 9,81 * \frac{P_b}{1000} \quad (8)$$

onde: P é a pressão atmosférica local, T a temperatura da cabine e P_b a pressão barométrica em mmHg.

A pressão absoluta é calculada pela soma da pressão manométrica com a pressão atmosférica em (9).

$$P_a = dp + P \quad (9)$$

onde P_a é a pressão absoluta em kPa, dp a pressão manométrica e P a pressão atmosférica local.

$$\text{Segundo VAN WYLEN \& SONTAG [7],} \quad \rho = \frac{P_{abs}}{((T + 273,15) * 287,042)} \quad (10)$$

onde ρ é a densidade do ar em kg/m³, P_{abs} a pressão absoluta e T a temperatura do fluxo °C.

$$\text{Segundo WHITE [8],} \quad \mu = 3,958 * 10^{-8} * T + 1,7242 * 10^{-5} \quad (11)$$

onde μ é a viscosidade do ar em kg/m.s e T a temperatura do fluxo °C.

A seguir (Fig. 4), calcula-se o coeficiente de expansibilidade do ar levando-se em consideração a relação diâmetro da placa e diâmetro do tubo (valor de β), segundo DELMÉE [9], coeficiente isentrópico ($k=1,4$), a pressão manométrica corrigida, e a pressão atmosférica, calcula-se também a constante k_o ,

considerando-se o valor de β . O valor de β relaciona os valores dos diâmetros da placa e do tubo. $\beta = \frac{d}{D}$ onde d o diâmetro da placa e D o diâmetro do tubo. Já o cálculo do fator de escoamento real, k_o , segundo a ASME [6], foi feito por:

$$k_o = 0,6004 + 0,35 \beta^4 - 0,052 * (0,5 - \beta)^{\frac{3}{2}} + 0,62 * (\beta - 0,7)^{\frac{5}{3}} \quad (12)$$

O coeficiente de expansibilidade, segundo DELMÉE [9] foi calculado por:

$$e = 1 - \left(0,41 + 0,35 * \beta^4\right) * \left(\frac{dp}{P}\right) / k \quad (13)$$

om esses valores de entrada mostrados na Fig. 5, calcula-se o número de Reynolds iterativamente até um erro pré-estabelecido de 0,00000001, com esse resultado calcula-se a vazão mássica (descarga instantânea kg/h) e a vazão instantânea em m³/min. A vazão mássica, segundo PAGLIUSO [5], é dada por:

$$m = 0,012513 * K * d^2 * e * (\rho * dp)^{0,5} \quad (14)$$

e o número de Reynolds FOX & MCDONALD [10], por:

$$Re y = \frac{4 * m}{\pi * D * \mu * 3,6} \tag{15}$$

A análise de incerteza executada diretamente por computador pode ser efetuada pela perturbação seqüencial da entrada, de acordo ao procedimento explicado no item anterior.

A principal vantagem deste método é que o mesmo programa de interpretação de dados (Fig. 3, 4 e 5) é utilizado na contribuição da incerteza. Porém, a cada momento o programa é modificado, e as modificações são automaticamente incorporadas no cálculo das incertezas.

Para aplicar esta metodologia procedeu-se da seguinte maneira:

Na Fig. 6, verificamos a utilização das variáveis listadas para o cálculo das vazões obtidas pelo programa explicado anteriormente. Considerando agora a vazão como R_o , este seria um dos dados de entrada para calcular os correspondentes R_{i+} e R_{i-} .

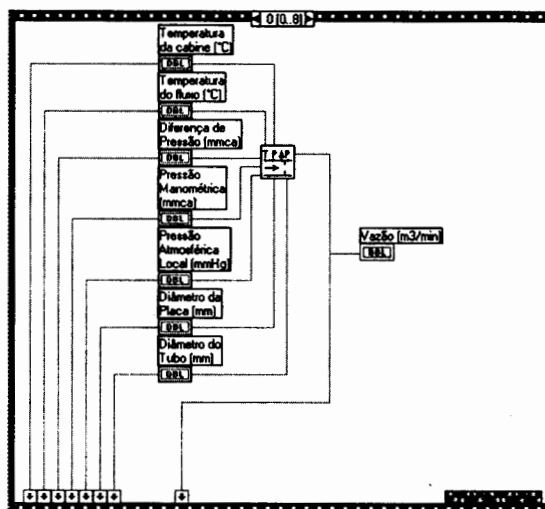


Fig. 6. Tela de diagrama de cálculo da vazão considerado como R_o .

Na Fig. 7, mostra-se o cálculo da temperatura da cabine avaliada pela incerteza do instrumento de medição (0,05 °C), calcula-se o valor de C_+ e C_- , efetua-se a média aritmética dos mesmos encontrando-se C_1 .

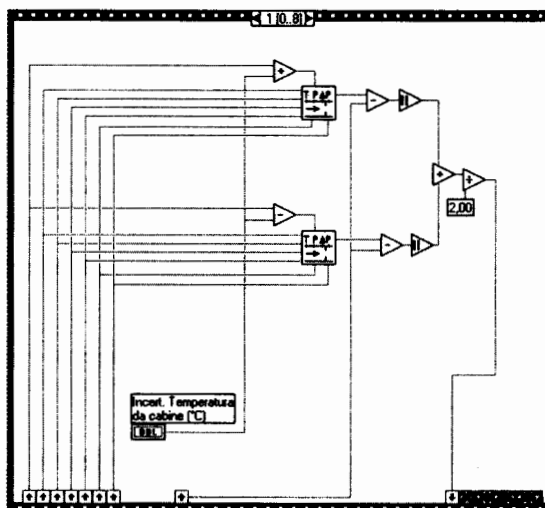


Fig. 7. Tela de diagrama de cálculo de C_1 , dado pela incerteza do instrumento com que foi medida a temperatura da cabine (0,05 °C).

O instrumento com que foi medida a temperatura do fluxo foi um termopar. Para o cálculo de C_2 , dado pela incerteza deste termopar, é necessário explicar primeiro a metodologia para a calibração e cálculo da incerteza deste termopar usado.

Esta metodologia está detalhada na referência [4]. Para esta temperatura de referência foram medidos dez valores de temperatura, isto é, 12 amostras de $n = 10$ cada. Calculou-se a média e o desvio padrão para cada amostra como mostra a Tabela 1.

Tabela 1. Amostras obtidas para a calibração do termopar com os valores das médias e desvio padrão.

No. de amostras	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T. refer. oC	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	95	100
1	0,03	9,72	19,36	29,04	38,15	48,54	60,22	69,64	79,7	90,05	95,48	100,48
2	0,05	9,64	19,41	28,97	38,73	48,42	59,95	69,68	79,69	89,89	95,26	100,43
3	0,02	9,71	19,53	28,97	38,69	48,42	59,97	69,69	79,73	89,85	95,42	100,35
4	0,01	9,65	19,4	29,09	38,71	48,39	59,9	69,74	79,69	90	95,29	100,29
5	0,06	9,71	19,41	29,06	38,72	48,45	59,95	69,73	79,68	89,91	95,29	100,35
6	0,01	9,61	19,48	29,03	38,83	48,42	59,91	69,8	79,75	89,89	95,35	100,45
7	0	9,74	19,39	29,04	38,7	48,47	59,99	69,73	79,7	89,97	95,45	100,29
8	0,04	9,67	19,38	29,04	38,75	48,37	59,89	69,79	79,83	89,99	95,27	100,31
9	0,09	9,60	19,41	29,12	38,66	48,4	59,82	69,79	79,66	89,88	95,32	100,36
10	0,04	9,59	19,43	28,97	38,69	48,34	60,03	69,66	79,67	89,93	95,35	100,36
valor médio	0,035	9,664	19,420	29,033	38,663	48,422	59,963	69,725	79,710	89,936	95,348	100,37
d. padrão	0,027	0,054	0,050	0,051	0,186	0,056	0,108	0,057	0,050	0,064	0,078	0,067

Com os valores médios x de temperatura de cada amostra e com as temperaturas de referências y , foram calculadas as estimativas dos mínimos quadrados \hat{a} e \hat{b} , e construído um gráfico com a curva de tendência, como mostra a Fig. 8. Significa então que $\hat{a}=0,9923$ e $\hat{b}=0,804$ são os coeficientes da equação de tendência, e os valores de previsão: $\hat{y} = \hat{a}x + \hat{b} = 0,9923x + 0,804$

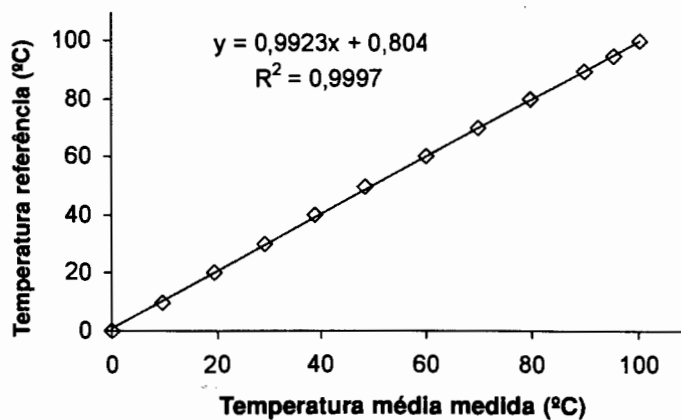


Fig. 8. Valores de temperatura média (°C) e temperatura referência (°C) e linha de tendência e sua equação estimada por mínimos quadrados

O valor da soma de quadrados do desvio da média de x , calculou-se pela seguinte equação:

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (16)$$

Substituindo valores: $S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - 53,36)^2 = 13053,20$

Logo calculou-se os resíduos $\hat{\epsilon}$ segundo a equação (17). A Tabela 2 mostra estes valores.

$$\hat{\epsilon}_i = y_i - \hat{b} - \hat{a}x_i \tag{17}$$

Tabela 2. Temperatura média de cada amostra x , temperaturas de referência y e resíduos $\hat{\epsilon}$ para o termopar.

y	X	$\hat{\epsilon}$
0	0,04	-0,84
10	9,66	-0,39
20	19,42	-0,07
30	29,03	0,39
40	38,66	0,83
50	48,42	1,15
60	59,96	-0,31
70	69,73	0,01
80	79,71	0,10
90	89,94	-0,05
95	95,35	-0,42
100	100,37	-0,40

Para obter a soma dos quadrados devido à incerteza, substitui-se os valores dos $\hat{\epsilon}$ na equação (9).

$$SQR = \sum_{i=1}^n \hat{\epsilon}_i^2 = S_{yy} - \frac{S_{xy}^2}{S_{xx}} \tag{18}$$

Substituindo valores: $SQR = \sum_{i=1}^n \hat{\epsilon}_i^2 = 3,46$

A estimativa da variância σ^2 é dada pela variância amostral, equação (19):

$$s^2 = \frac{SQR}{n-2} \tag{19}$$

Substituindo valores: $s^2 = 0,35$ Então o desvio padrão amostral é:

$$s \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x^* - \bar{x})^2}{S_{xx}}} \tag{20}$$

Substituindo valores: $s = 0,59$

Para um valor específico $x = x^*$, a resposta esperada para $ax^* + b$, com um intervalo de confiança $100(1-\alpha) \%$ é dada pela equação (21):

$$\hat{a}x^* + \hat{b} \pm t_{\alpha/2} s \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x^* - \bar{x})^2}{S_{xx}}} \tag{21}$$

onde t tem uma distribuição t de “Student” com $n-2$ graus de liberdade. Substituindo os valores:

$$\hat{y} = 0,9923x^* + 0,804 \pm t_{\alpha/2} 0,59 \sqrt{\frac{1}{12} + \frac{(x^* - 53,36)^2}{13053,20}} \tag{22}$$

Para um intervalo de confiança 95 %, ($\alpha = 0,05$) temos:

$$\hat{y} = 0,9923x^* + 0,804 \pm (2,228)0,59 \sqrt{0,083 + \frac{(x^* - 53,36)^2}{13053,20}} \tag{23}$$

Para o caso em que o valor x^* seja um valor médio de uma amostra, deve-se ter em conta as incertezas avaliadas por métodos estatísticos tipo A (S_A), equação (2). O termómetro com que foi medida a temperatura de referência tem uma incerteza sistemática (tipo B), dado pelo fabricante no certificado de calibração, incerteza de 0,05 oC ($S_B = 0,05$ oC).

Finalmente a incerteza total deve ser obtida pela RSS de todas as incertezas:

$$RSS = \sqrt{(S_{MQ})^2 + (S_A)^2 + (S_B)^2} \quad (24)$$

onde S_{MQ} é a incerteza estimada pela aplicação do método dos mínimos quadrados.

A seguir, mostra-se um exemplo de previsão da temperatura a partir de valores de temperatura medidos com o termopar em questão. Foram 10 amostras de 10 medições cada, na Tabela 3 mostra-se o valor médio dessas 10 medições (x^*) e seu correspondente desvio padrão S_A para um intervalo de confiança de 95 %.

Não se levou em consideração a possível existência de incerteza sistemática (tipo B), do sistema de aquisição de dados composto por um microcomputador, a placa AD-STRAWBERRY TREE e o terminal de compensação T-21 STRAWBERRY TREE.

Em muitas situações a incerteza total em um resultado dado, é dominada por poucos termos. Pode-se observar como os valores de S_A e S_B não influenciam muito sobre o valor da incerteza total, conforme Tabela 3. Esses valores são bem menores que a incerteza padrão estimada pela aplicação dos mínimos quadrados. Na referência [2] afirma-se que, quando alguns termos da equação de incerteza são menores que 1/3 do maior termo, eles podem ser geralmente desprezados.

Tabela 3. Valores das incertezas para valor de x^* obtidos com o termopar.

valor médio 10 medições x^* °C	$0,9923x^* + 0,804$	$S_{MQ} = \pm 1,31 \sqrt{0,083 + \frac{(x^* - 53,36)^2}{13053,20}}$	$S_A = \frac{tS_{(n)}}{\sqrt{n}}$	$RSS = \sqrt{(S_{MQ})^2 + (S_A)^2 + (S_B)^2}$
90,24	90,35	0,57	0,05	0,58
80,49	80,68	0,49	0,08	0,51
70,04	70,30	0,42	0,07	0,44
60,10	60,44	0,39	0,05	0,40
50,25	50,67	0,38	0,05	0,40
40,44	40,94	0,41	0,04	0,42
30,48	31,05	0,46	0,02	0,47
20,70	21,34	0,53	0,02	0,54
10,73	11,45	0,62	0,03	0,63
0,59	1,39	0,71	0,02	0,72

Por isso, foi considerado nas medições de temperatura, só o valor da incerteza padrão estimada da aplicação dos mínimos quadrados, equação (23).

Assim, o procedimento de cálculo do valor de C_2 é o mesmo feito para calcular C_1 . Na Fig. 9, pode-se observar este procedimento. A equação para o cálculo da incerteza do termopar foi implementada pelo programa como mostrado na Fig. 10.

Dá mesma forma que foi calculado C_1 e C_2 , calculou-se C_3 utilizando-se a incerteza do instrumento de medição da diferença de pressão medida na placa de orifício. Este instrumento foi uma régua com divisão mínima de 1 mm.

Pode-se admitir o limite de erro de calibração L_c como a menor divisão da régua, porém, sua incerteza sistemática pode ser considerada como $L_c/2$ [11], neste caso a incerteza da régua seria 0,5 mm. Este foi um dos dados de entrada na tela da Fig. 11.

Fig. 9. Tela de diagrama de C_2 , dado pela incerteza do instrumento com que foi medida a temperatura do fluxo.

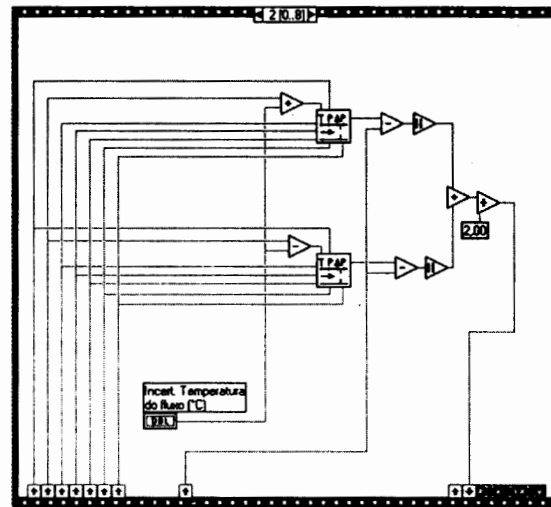


Fig. 10. Tela de diagrama de cálculo da incerteza do termopar para o cálculo de C_2 .

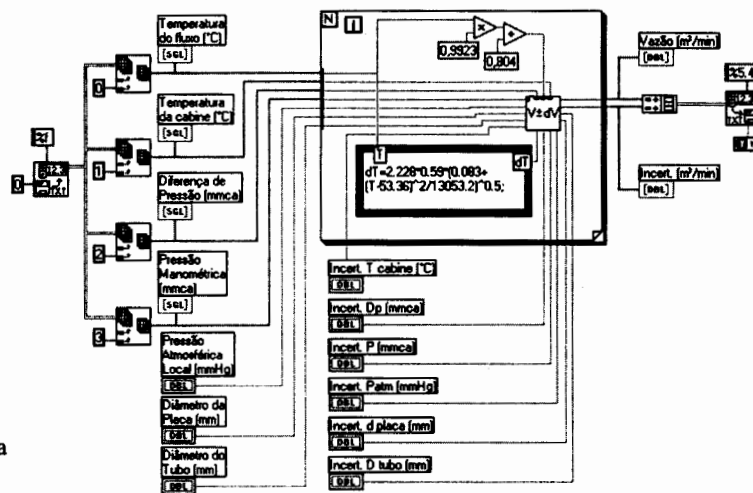
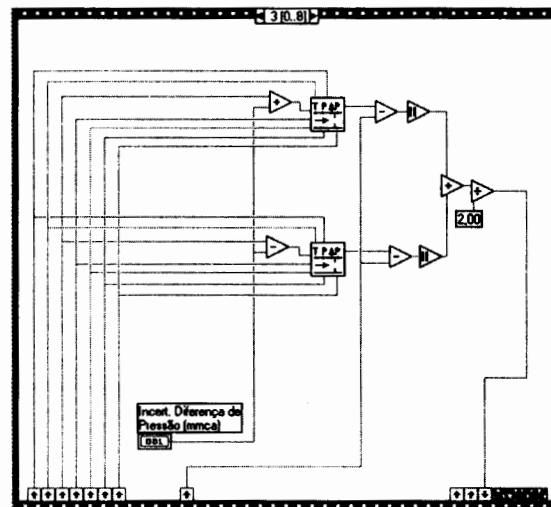


Fig. 11. Tela de diagrama de cálculo C_3 , dado pela incerteza do instrumento com que foi medida a diferença de pressão na placa de orifício.



O cálculo de C_4 corresponde à incerteza do instrumento com que foi medida a pressão no bocal, este instrumento foi o manômetro de coluna inclinada. Sua régua tem uma incerteza de 0,5 mm. O procedimento para o cálculo de C_4 foi o mesmo que C_1 , C_2 e C_3 .

A pressão manométrica do local foi medida com um barômetro. A incerteza deste instrumento é de 0,5 mm de Hg que permitiu o cálculo de C_5 .

Os diâmetros dos orifícios das placas e o diâmetro do tubo foram medidos com um paquímetro com nônio de 50 divisões, a menor leitura explicitamente indicada é $1/50 \text{ mm} = 0,02$. O limite de erro de calibração pode ser admitido como a menor leitura ($L_c = 0,02 \text{ mm}$). Para um paquímetro comum, este limite de erro pode ser de pouca confiança, devido à dilatação térmica, deformações e folgas nas réguas. Neste caso, é difícil atribuir nível de confiança de 95 % ao limite de erro. É melhor admitir como incerteza o valor de L_c , isto é 0,02 [11]. Então, o cálculo de C_6 e C_7 corresponde às incertezas do paquímetro com que foram medidos os diâmetros dos orifícios das placas e o tubo.

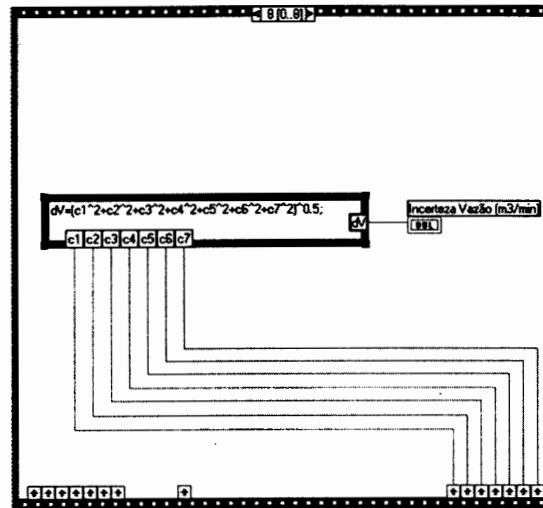


Fig. 12. Tela de diagrama de cálculo de incerteza dos resultados (raiz da soma dos quadrados de C_i).

Finalmente com os valores de C_i ($i = 1 \dots 7$), calculou-se a RSS de C_i que seria a incerteza sistemática da vazão como se mostra na Fig. 12. Para cada valor de diferença de pressão medido no bocal, corresponde um valor de vazão e um valor de incerteza calculado pelo programa anteriormente explicado.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para obtenção da curva de calibração do bocal foram feitos 36 ensaios, para cada um foi encontrado o valor de fluxo a partir do programa já explicado com sua correspondente incerteza, como se mostra na Tabela 4. Com esses valores de pressão no bocal e fluxo foi obtida uma curva de regressão linear com $R^2 = 0,9975$:

$$\hat{y} = 0,0158x + 1,4306$$

A partir daí, calculou-se a incerteza dos mínimos quadrados e a RSS, Tabela 4.

Tabela 4. Valores das medidas e suas correspondentes incertezas.

Pressão no bocal mmcia	Vazão[m3/min] Obtida pelo Programa	Incerteza de calibração correspondente	Incerteza mínimos quadrados	
			$S_{mq} = \pm(2,228)0,0526 \sqrt{0,027 + \frac{(x' - 119,29)^2}{798508,2}}$	$RSS = \sqrt{(S_c)^2 + (S_m)^2}$
5,5	1,2053	0,003	0,05041068	0,0505
6,0	1,2676	0,003	0,05032915	0,050418
7,0	1,3245	0,003	0,05016677	0,050256
8,5	1,3855	0,0031	0,04992492	0,050021
9,0	1,4471	0,0031	0,04984477	0,049941
11,0	1,5044	0,0032	0,04952653	0,04963
12,5	1,5625	0,0033	0,04929035	0,049401
14,0	1,6194	0,0033	0,04905636	0,049167
15,0	1,6795	0,00375	0,04890158	0,049045
16,0	1,7346	0,00378	0,04874781	0,048894
17,5	1,7924	0,00389	0,04851902	0,048675
19,0	1,846	0,0037	0,04829252	0,048434
23,0	1,84	0,004	0,04769995	0,047867
25,5	1,86	0,00417	0,04733824	0,047522
30,0	1,89	0,004	0,0467045	0,046875
32,5	1,98	0,00422	0,04636234	0,046554
36,0	2,17	0,0048	0,04589557	0,046146
38,5	2,18	0,00444	0,04557115	0,045787
42,5	2,18	0,00456	0,04506808	0,045298
51,5	2,33	0,00467	0,04401138	0,044258
59,0	2,36	0,00456	0,04321472	0,043455
65,0	2,6	0,0052	0,04263542	0,042951
69,0	2,65	0,0052	0,04227905	0,042598
135,0	3,67	0,00669	0,04027924	0,040831
146,0	3,73	0,00672	0,0406961	0,041247
159,0	4	0,00731	0,04145643	0,042096
171,0	4,13	0,00756	0,04240278	0,043071
184,0	4,43	0,00781	0,0436747	0,044368
197,0	4,54	0,00806	0,04518202	0,045895
211,0	4,88	0,0087	0,0470425	0,04784
225,0	5,04	0,0088	0,04912165	0,049904
391,0	7,56	0,01228	0,08333773	0,084238
420,0	8,201	0,0132	0,09025541	0,091216
451,0	8,4802	0,01383	0,09779709	0,09877
480,0	8,9	0,0141	0,1049613	0,105904
511,0	9,4	0,015	0,11271297	0,113707

Da análise da Tabela 4, constatou-se que S_c não influencia muito sobre o valor da incerteza total. Esses valores são bem menores que a incerteza estimada pela aplicação do método dos mínimos quadrados (menor que um terço do maior termo). Desta forma a equação de calibração do bocal foi representada por:

$$\hat{y} = 0,0158x^* + 1,4306 \pm (2,228)0,0526 \sqrt{0,027 + \frac{(x^* - 119,29)^2}{798508,2}} \quad (25)$$

Significando que a incerteza sistemática (tipo B) S_B , foi desconsiderada. Essa decisão só pôde ser tomada depois da quantificação da mesma, o que justifica a aplicação de toda a metodologia aqui exposta.

CONCLUSÕES

A metodologia utilizada constitui uma importante ferramenta para quantificação das incertezas sistemáticas e aleatórias envolvidas no processo de calibração do bocal para medir consumo de ar em motores de combustão interna. Apesar de comprovar-se que as incertezas sistemáticas (tipo B) podem ser desconsideradas nesse procedimento, foi necessário seu cálculo para tomar esta decisão. Decisão baseada na comparação com a incerteza padrão estimada pela aplicação do método dos mínimos quadrados.

Ressalta-se ainda que a avaliação da relação linear é medida por R^2 , porém este valor poderia dar uma estimativa de proceder ou não ao cálculo de outras incertezas. No caso aqui tratado, para um $R^2=0,9975$, implicaria valores de S_{MQ} muito pequenos ($R^2 \approx 1$), porém, foi necessário calcular os valores de S_B para serem comparados, resultando neste caso na rejeição destes valores de S_B .

AGRADECIMENTOS

À FAPESP - Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo: processos: N.º 98/13542-4 e N.º 00/05188-8 e ao CNPq-PICDT - Conselho Nacional de Pesquisa.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] ISO R-5167 «Measurement of Fluid Flow, by Means of Orifice Plates and Nozzles», International Standardization Organization (1980).
- [2] Moffat, J. R., «Some Experimental Methods for Heat Transfer Studies», *Experimental Thermal and Fluid Science* (1990).
- [3] Kline, S.J., e McClintock, F.A., «Describing uncertainties in single-sample experiments». *Mechanical Engineering* (1953).
- [4] Achcar, J. A., «Planejamento de Experimentos em Engenharia e Indústria», *EESC-USP. IMSC* (1995).
- [5] Pagliuso, J.D., *Determinação do Coeficiente de Transferência de Calor em Leito Circulante*. Vol II, Tese doutorado (1994).
- [6] ASME (American Society of Mechanical Engineering), *Fluid Meters, Their Theory and Application* (1959).
- [7] Van Wylen e Sonntag, *Fundamentals of Thermodynamics*. John Wiley & Sons, New York (1998).
- [8] White, F.M., *Viscous Fluid Flow* (2ª ed), International Student Edition - McGraw-Hill, New York (1991).
- [9] Delmée, G.J., *Manual de medição de vazão*. Edgard Blücher, São Paulo (1983).
- [10] Fox, R.W. e McDonald, A.T., *Introduction to Fluid Mechanics*, 5 th ed., University of Toronto Press, Toronto, Canadá (1998).
- [11] Vuolo, J. H., *Introdução à Teoria de Erros*, Universidade de São Paulo. Instituto de Física (1999).

UNCERTAINTIES ON AIR FLOW RATE MEASUREMENTS THROUGH A NOZZLE USED FOR MEASURING AIR CONSUMPTION IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES.

Abstract: The reliability of experimental results is quite dependent on measurement uncertainties. In this work a methodology is applied for calculating air flow rates from the pressure drop through a nozzle commonly used for air consumption measurements in internal combustion engines. Both systematic (B type) and random (A type) uncertainties are considered. The nozzle was calibrated using a standard orifice plate set up. Measurements were performed of ambient and airflow temperatures, pressure drop through the plate, atmospheric pressure and static pressure. It was found that systematic uncertainties could be disregarded. This was shown through a comparison of the obtained uncertainties to the standard uncertainties obtained by applying the minimum square method.