

3

Instrumentação

O sistema de medição de vazão tem medição secundária instalada em posição pré-definida de acordo com as normas pertinentes, nos medidores de vazão tipo turbinas. São instalados os medidores de pressão estática e temperatura, junto ao medidor tipo turbina, com objetivo de medir as grandezas físicas, pressão e a temperatura, de operação do fluido, que serão utilizadas para o cálculo da vazão e para que a mesma seja corrigida para as condições de referências estabelecidas em norma internacional, conforme tabela 1.

Cada fabricante tem suas peculiaridades no que se refere às instruções para operação de seus equipamentos. Para que a garantia possa ter validade, os manuais devem ser seguidos à risca.

3.1

Medidores de Pressão e Temperatura

O transmissor de pressão instalado no ponto de medição de vazão é do tipo strain-gauge, isto é, trata-se de um sensor de deformação, que ao se deformar, seu valor de resistência irá variar direta e proporcionalmente à pressão. A saída gerada é um sinal de corrente que varia de 4 a 20 mA, que corresponde 0 a 100 % da faixa de trabalho do instrumento.

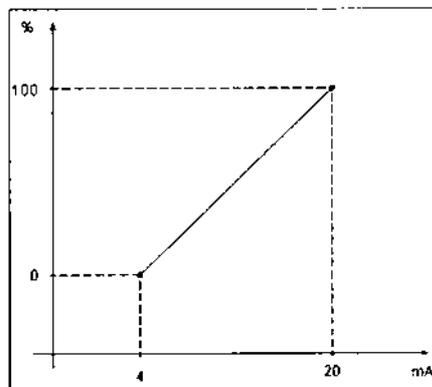


Figura 11: Curva de resposta típica dos transmissores

O transmissor de temperatura instalado no ponto de medição de vazão por turbina, tem como sensor uma termoresistência do tipo Pt-100 a quatro fios cuja saída, um sinal de resistência, está ligada diretamente a um sistema conversor e gera um sinal proporcional de 4 a 20 mA. Os elementos do sistema de medição são sensores de temperatura que operam baseados no princípio da variação da resistividade elétrica de um metal, em função da temperatura, sendo confeccionados com fios altamente purificados de platina.

Cinco termômetros de resistência do tipo Pt-100 serão usados para medição de temperatura. Eles foram calibrados pelo laboratório de Pressão e Temperatura da PUC-Rio (LPT-ITUC), com as seguintes características.

A seguinte expressão é usada para relacionar resistência e temperatura, cujos valores dos coeficientes foram calculados através de um ajuste pelo método dos mínimos quadrados:

$$R/R_0 = 1 + \alpha.t + \beta.t^2 \quad (85)$$

No caso descrito acima, os sinais provenientes da instalação de campo são processados por sinal elétrico de corrente que será acoplado a um sistema de aquisição de dados, onde o volume de gás é corrigido para as condições de base do contrato.

Associados aos elementos de medição secundários existem erros aleatórios, expressos por seus fabricantes por expressões do tipo:

$$\text{Erro} = \text{Percentual do "span" calibrado}$$

O "span" calibrado é a faixa de trabalho na qual o instrumento é configurado para trabalhar.

Adicionalmente ao fato de que a calibração do fabricante tem um limitado valor metrológico legal, estudos estatísticos sobre os transmissores revelam que nem sempre o que é especificado no instrumento é verdadeiro. O erro de medição de um instrumento é definido como a diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro. Como esse último nunca é conhecido, o erro de medição também não é conhecido.

Um parâmetro metrológico utilizado para definir o desempenho do instrumento ou a confiabilidade de uma medição é a chamada Incerteza de Medição. Ela define uma faixa da grandeza medida onde se supõe que o valor verdadeiro esteja dentro de um determinado nível de confiabilidade (normalmente 95,45%).

Independentemente do valor do erro aleatório, pode-se explicitar graficamente a incerteza percentual do instrumento conforme ilustrado no gráfico da figura 12. A expressão de incertezas em termos percentuais é consagrada na medição de vazão, dadas às características metrológicas dos elementos secundários.

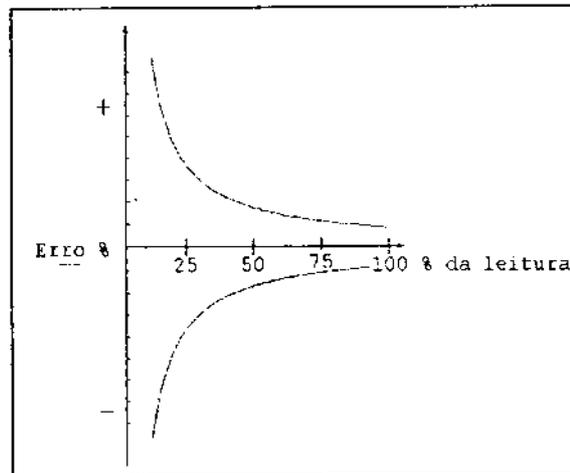


Figura 12: Expressão gráfica da incerteza do instrumento de medição

3.2

Medidor de Vazão Tipo Turbina

Os medidores de vazão tipo turbina são acoplados diretamente na tubulação do processo. As turbinas são elementos de medição inferenciais que possuem um rotor como elemento principal. O fluido que escoar através do medidor aciona um rotor montado axialmente no interior deste. A rotação do rotor é proporcional a velocidade do fluido que está escoando, estabelecendo portanto uma relação conhecida entre a vazão e a velocidade de deslocamento. Como a área do escoamento é conhecida, pode-se escrever:

$$V = v \times A \quad (86)$$

Dentre os tipos de turbinas existentes, a mais adequada e escolhida para o projeto foi a do tipo eixo axial. Para a medição de gases, a disposição da turbina é feita de maneira a aumentar o torque disponível, aumentando-se assim a velocidade do gás. O torque do rotor depende da massa específica do fluido e do quadrado de sua velocidade, o gás natural é forçado a passar por um espaço

anular onde fica o rotor, em disposição axial [Delmée, 1995]. Um sensor acoplado ao medidor tem seu campo magnético alterado, a cada vez que uma pá do rotor passa por ele, provocando um pulso elétrico, que processado, possibilitará saídas de corrente para o sistema de aquisição de dados, onde se encontra o software que corrige o volume de gás para as condições de base do contrato.

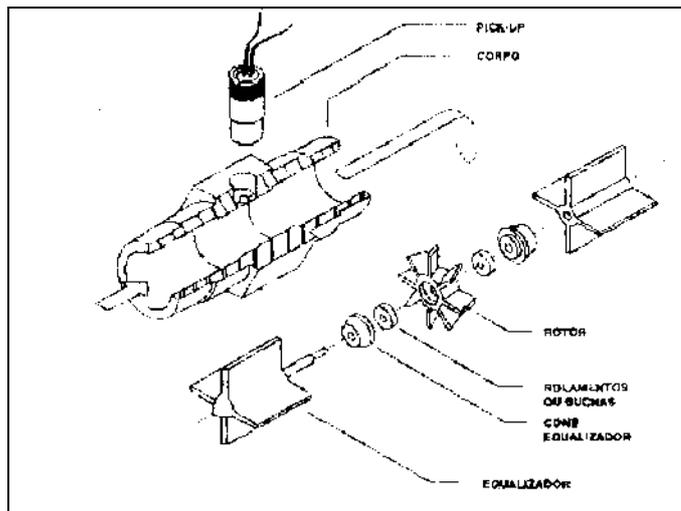


Figura 13: Vista explodida do medidor de vazão tipo turbina

A rotação do elemento primário é transmitida através de eixos e engrenagens a um totalizador mecânico que indica o volume nas condições locais de temperatura e pressão. A tomada de pressão do corpo da turbina, especificada pelo fabricante, deve ser usada como o ponto de medição de pressão, onde é conectado o instrumento de indicação ou registro oficial.

A expressão da vazão mássica nesse caso é dada pela equação abaixo, obtida da Lei dos Gases Ideais e corrigida pelo fator de compressibilidade característica dos escoamentos compressíveis. Assim,

$$m = V(pM) / Rtz \quad (87)$$

Considerando as unidades do Sistema Internacional (S.I.)

m = vazão mássica, em kg/s;

V = vazão volumétrica, m³/s;

p = Pressão de leitura, em kPa;

M = massa molar média, em g/mol

R = constante universal dos gases, 8,31451 J/mol.K;

z = fator de compressibilidade, adimensional;

t = temperatura de leitura, em K.

3.3

Calibração do Transmissor de Pressão

O transmissor de pressão foi calibrado na faixa de 0 a 10 bar, usando como padrão uma balança de peso morto, com uma incerteza de 0,015 %, para um nível de confiança de 95,45 % ($k=2$).

3.3.1

Objetivo

Descrever os procedimentos para calibração do Transmissor de Pressão, realizado no Laboratório de Pressão e Temperatura da PUC-Rio (LPT-ITUC), no dia 27 de maio de 2003.

3.3.2

Características dos Instrumentos Padrões

- BALANÇA DE PRESSÃO

Fabricante: *XIAN*

Modelo/Tipo: *YS-600/Óleo*

Número de Série: *951022*

Número do Certificado: *LAPRE – 0125/2000*

Incerteza expandida: $\pm 0,015$ % (Transcrito do certificado de calibração do fabricante, indicado no anexo 1)

Data da Calibração: *10/4/2000*

- NANOVOLTÍMETRO/MICROHMÍMETRO 7 ½ DÍGITOS

Fabricante: *Hewlett Packard*

Modelo/Tipo: *34420A*

Número de Série: *US34000228*

Número do Certificado: *45509 (IPT)*

Data da Calibração: 18/10/2002

3.3.3

Características do Instrumento a Ser Calibrado

- TRANSMISSOR DE PRESSÃO, CLASSE 0,5 %

Fabricante: *WIKA*

Modelo/Tipo: *Ajuste de “Zero” e “Span” Sensor Piezo – Resistivo*

Número de Série: *S#3600593 , P#3754470*

Número do Certificado: *45509 (IPT)*

Data da Calibração: 18/10/2002

3.3.4

Procedimentos de Calibração

- O transmissor foi calibrado com uma bomba manométrica, comparando-se a pressão utilizada com a do padrão;
- O Transmissor foi calibrado na vertical, à temperatura de $22\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$;
- Conectar o transmissor no dispositivo de calibração e efetuar as ligações, junto ao padrão de instrumentação estabelecido para calibração do transmissor de pressão;
- Nivelar a balança de pressão;
- Gerar valores de pressão no sentido ascendente (carregamento) e descendente (descarregamento), correspondentes aos valores fixados no plano de calibração;
- Aguardar estabilização da leitura indicada no padrão, a fim de se determinar a histerese;
- Efetuar três ciclos para determinação calibração.

Nota: No momento da leitura no multímetro, o cilindro com as massas da balança estava em movimento giratório, pois assim, eliminamos o atrito estático.

3.3.5

Considerações

- Foi usado um resistor de 1 Ω / 5 % para leitura em mV;
- Considerou-se 10 bar = 1 MPa;
- Padrões de massas utilizados na balança (Pistão 007, 001, 002, 003 e 005);
- Para corrigirmos o valor da pressão carregada (p_{car}), na tabela 11, utilizamos a equação apresentada no certificado de balança de pressão:

$$p_{Cor} = (p_{car}) * (g / g_n) * (1 + (\alpha_c + \alpha_p) * (t - 20) + \lambda p_n)^{-1} \quad (88)$$

onde:

g = aceleração da gravidade local (9.7878 m/s²)

g_n = aceleração da gravidade normal: (9,80665 m/s²)

t = temperatura (°C) do conjunto pistão-cilindro

α_c e α_p = coeficientes de dilatação térmico linear do cilindro e pistão:

($1,1 * 10^{-6}$, para aço inox)

λ = coeficiente de deformação do conjunto pistão-cilindro (MPa⁻¹)

p_n = Pressão nominal (MPa)

3.3.6

Resultados Obtidos

Tabela 11: Valores medidos no transmissor de pressão

p_{car} (MPa)	$p_{car}+p_{atm}$ (MPa)	Primeiro Ciclo (mV)		Segundo Ciclo (mV)		Terceiro Ciclo (mV)	
		Subida	Descida	Subida	Descida	Subida	Descida
0,0000	0,1013	5,44	5,46	5,46	5,46	5,47	5,45
0,3095	0,4108	10,07	9,99	10,08	10,07	9,99	10,08
0,4068	0,5081	11,61	11,58	11,61	11,60	11,59	11,61
0,4896	0,5909	13,15	13,14	13,08	13,15	13,10	13,14
0,5882	0,6895	14,59	14,66	14,65	14,68	14,65	14,66
0,6862	0,7875	16,19	16,21	16,20	16,21	16,20	16,21
0,8005	0,9018	17,72	17,74	17,73	17,72	17,72	17,74
0,8978	0,9991	19,26	19,28	19,25	19,27	19,27	19,26

O erro médio nos pontos foi calculado utilizando-se a definição conforme o Vocabulário Internacional de Metrologia, onde o erro é igual ao valor lido no instrumento menos o valor lido no padrão, conforme tabela 12.

Tabela 12: Análise da incerteza do transmissor de pressão

Valor Médio (mV)	Valor Médio Objeto (bar)	Erro Médio (bar)	Desv. Pad. (mV)
5,46	0,910	0,1026	0,0103
10,05	3,779	0,3291	0,0441
11,60	4,750	0,3310	0,0126
13,13	5,704	0,2045	0,0294
14,65	6,655	0,2402	0,0306
16,20	7,627	0,2480	0,0082
17,73	8,580	0,4377	0,0098
19,27	9,541	0,4500	0,0105

Utilizando o método dos mínimos quadrados, verificamos que a função linear é a que melhor se ajusta a curva de calibração, com uma incerteza de ajuste (u_{Ajuste}) igual a 0,07044 bar, conforme tabela abaixo:

Tabela 13: Escolha da curva de ajuste do transmissor de pressão

$P_{\text{car}}+P_{\text{atm}}$ (MPa)	Valor Médio (bar)	Ajuste Linear	Ajuste 2° Grau
0,1013	0,91000	0,86349	0,87437
0,4108	3,77900	3,87932	3,87474
0,5081	4,75000	4,82743	4,82128
0,5909	5,70400	5,63425	5,62800
0,6895	6,65500	6,59503	6,59015
0,7875	7,62700	7,54996	7,54805
0,9018	8,58000	8,66372	8,66728
0,9910	9,54100	9,5329	9,54225
u_{Ajuste}		0,07044	0,07498

Combinando a incerteza de ajuste com a incerteza do padrão (0,0075 bar), conseguimos uma incerteza padrão combinada do transmissor de pressão igual a 0,071 bar.

A incerteza expandida (U) de medição do transmissor de pressão, foi calculada em 0,142 bar ou 1,42 %, para um nível de confiança de 95,45 % (k=2).

3.4

Calibração Pt-100

Os cinco sensores de temperatura Pt-100 foram calibrados na faixa de 0 a 150 °C, usando os padrões do Laboratório de Pressão e Temperatura da PUC-Rio (LPT-ITUC), nos dias 5 e 6 de julho de 2003.

3.4.1

Objetivo

Descrever os procedimentos para calibração de Pt-100, realizado no Laboratório de Pressão e Temperatura do ITUC, nos dias 5 e 6 de julho de 2003.

3.4.2

Características dos Instrumentos Padrões

- TERMORESISTÊNCIA PT-100 - 06
Fabricante: Ecil
Escala: -50,0 °C à +300,0 °C
Número do Certificado: 0370/02 (LPT/ITUC)
Data da Calibração: 05/10/2002

- NANOVOLTÍMETRO/MICROHMÍMETRO 7 ½ DÍGITOS
Fabricante: *Hewlett Packard*
Modelo/Tipo: 34420A
Número de Série: US34000228

Número do Certificado: 45509 (IPT)

Data da Calibração: 18/10/2002

3.4.3

Características do Instrumento a Ser Calibrado

- TERMORESISTÊNCIA, TIPO PT-100 , CLASSE A, LIGAÇÃO 4 FIOS
Fabricante: Ecil
Escala: 0,0 °C à +150,0 °C
Haste: 200 mm
Diâmetro: 6 mm

3.4.4

Procedimento de Calibração

- Conectar o objeto no dispositivo de calibração e efetuar as ligações, junto ao padrão de instrumentação estabelecido para calibração do Pt-100;
- Colocar em um banho térmico de temperatura controlada, o objeto e o padrão;
- Através do instrumento padrão, iremos gerar os valores simulando a temperatura no sentido ascendente, e aguardar estabilização do equilíbrio térmico;
- Após 30 minutos de estabilidade térmica foram registrados os valores da resistência elétrica do padrão e do objeto para uma escala de temperatura variando de 0 °C a 150 °C, de maneira crescente efetuaram-se seis (6) medições em cada ponto, num total de dez (10) pontos, para se determinar a repetitividade;

3.4.5

Considerações

- Um ajuste pelo método dos mínimos quadrados foi usado para se obter uma correlação entre o parâmetro R/R_0 , dos sensores, onde R é a resistência

elétrica medida a uma dada temperatura e R_0 é a resistência medida a 0 °C, e a temperatura do padrão (t), considerada a real, segundo a expressão:

$$R/R_0 = 1 + \alpha t + \beta t^2 \quad (89)$$

onde,

R = Resistência do objeto a temperatura t , ohm

R_0 = Resistência do objeto a 0 °C, ohm

t = Temperatura verdadeira, °C

α e β = Coeficientes de ajuste

O erro médio nos pontos foi calculado utilizando-se a definição conforme o Vocabulário Internacional de Metrologia, onde o erro é igual ao valor lido no instrumento menos o valor lido no padrão;

A incerteza de medição foi estimada ao nível de confiabilidade de 95,45 % ($k=2$) e leva em consideração a medida da resistência do padrão e do objeto, a incerteza de medida de temperatura com o padrão, e a incerteza do ajuste e a uniformidade do banho.

3.4.6

Resultados Obtidos

Os valores de calibração e as incertezas de medição dos termômetros Pt-100, estão representados em forma de tabelas no Apêndice A, e os coeficientes de calibração estão representados na tabela abaixo.

Tabela 14: Valores dos coeficientes de calibração dos Pt-100

Pt-100	R_0	α ($^{\circ}C^{-1}$)	β ($^{\circ}C^{-2}$)	Incert. Máx. ($^{\circ}C$)
01	99,9823	0,0039251	-6,4733E-07	0,06
02	99,9771	0,0039190	-6,3079E-07	0,07
03	99,9823	0,0039202	-6,330E-07	0,07
04	99,9823	0,0039166	-6,3609E-07	0,07
05	99,9823	0,0039225	-6,476E-07	0,08

3.5

Calibração do Medidor de Vazão Tipo Turbina

O medidor de vazão tipo turbina foi calibrado usando-se como padrão uma balança (Fabricante Alfa), conforme esquema da figura 14.

3.5.1

Objetivo

Descrever os procedimentos para calibração do medidor de vazão tipo Turbina, realizado no Laboratório de Vazão da PUC-Rio, no dia 31 de julho de 2003.

3.5.2

Características dos Instrumentos Utilizados para a Calibração do Medidor de Vazão Tipo Turbina

Os valores de referência dos instrumentos utilizados para a calibração do medidor de vazão tipo turbina encontram-se no Apêndice B.

3.5.3

Características do Instrumento a Ser Calibrado

- MEDIDOR DE VAZÃO TIPO TURBINA
Fabricante: *Contech*
Modelo/Tipo: *SVTG25/19BA4A4BS-22*
Range: 3,8 a 33 Nm³/h (não normalizado)
Diâmetro Nominal: 1"
Diâmetro Interno: 3/4"
Conexão ao processo: Rosca BSP-M
Alimentação: 24 Vdc
Sinal de saída: 4 a 20 mA

3.5.4

Procedimentos de Calibração

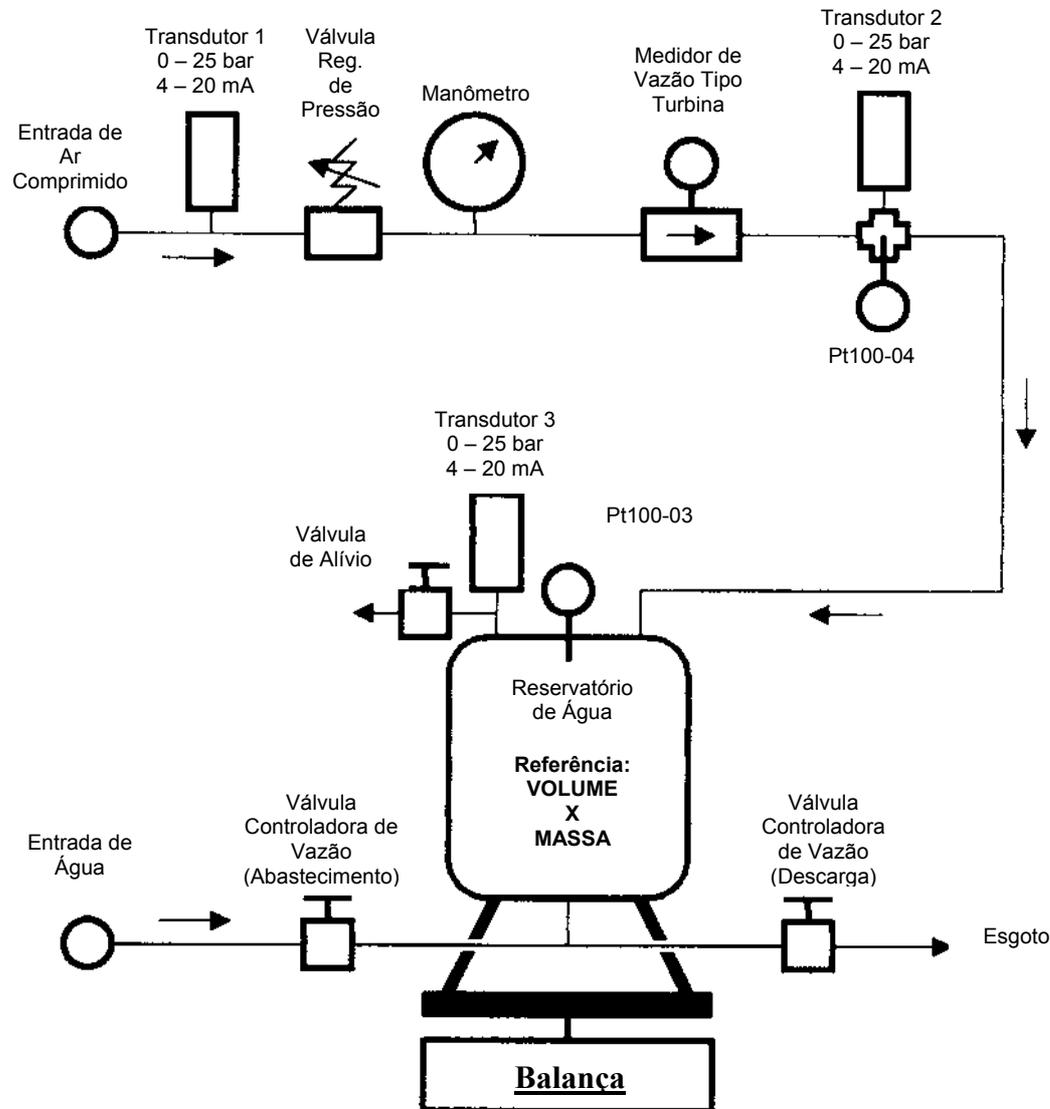


Figura 14: Esquema pneumático utilizado para a calibração do medidor de vazão tipo turbina

1º Passo - Encher o reservatório com água;

2º Passo – Abrir a válvula de ar comprimido e a válvula controladora de vazão de descarga, para com isso ter um fluxo de ar passando pelo medidor de vazão tipo turbina;

3º Passo – Para cada corrida de envasamento do reservatório:

- Calcular a derivada $\frac{dM}{dt} \approx \frac{\Delta M}{\Delta t}$, para vários valores de Δt ;

- Calcular a média (\bar{V}) em kg/s e o desvio padrão (s_V) da vazão;
- Calcular a média (\bar{T}_{urb}) em mA e o desvio padrão (s_{Turb}) da turbina.

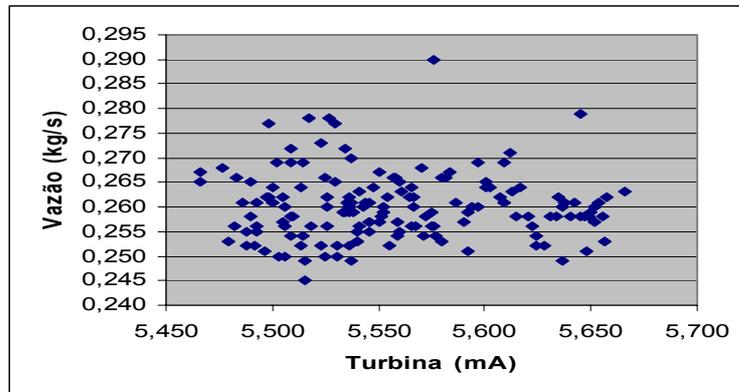


Figura 15: 1 leitura por segundo

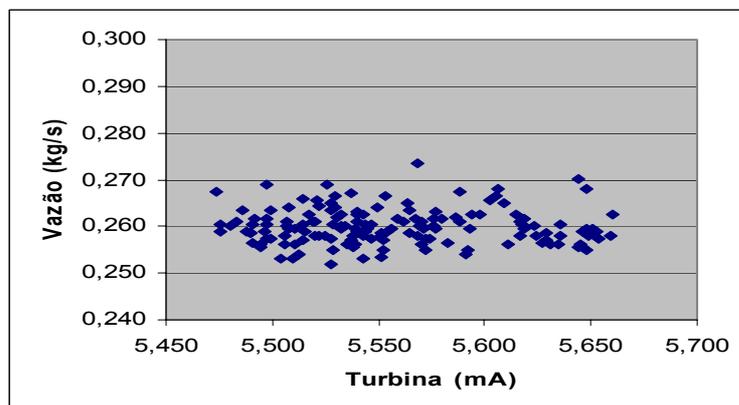


Figura 16: 1 leitura a cada 2 segundos

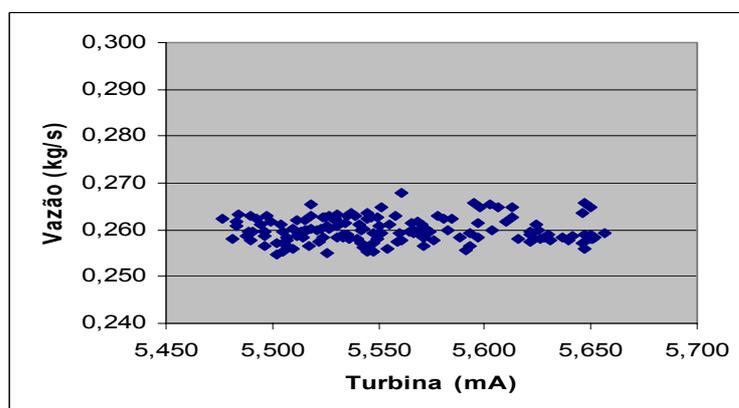


Figura 17: 1 leitura a cada 3 segundos

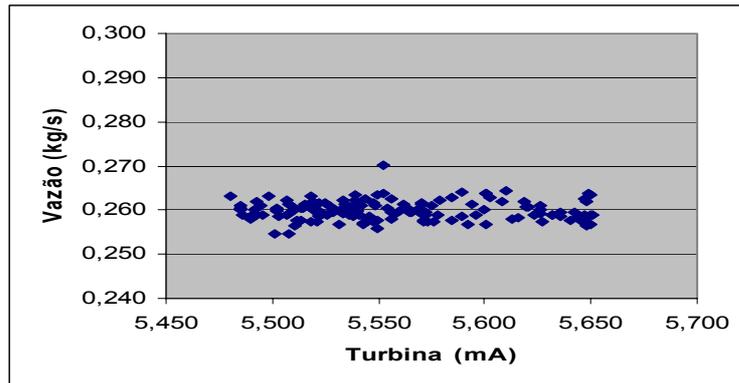


Figura 18: 1 leitura a cada 4 segundos

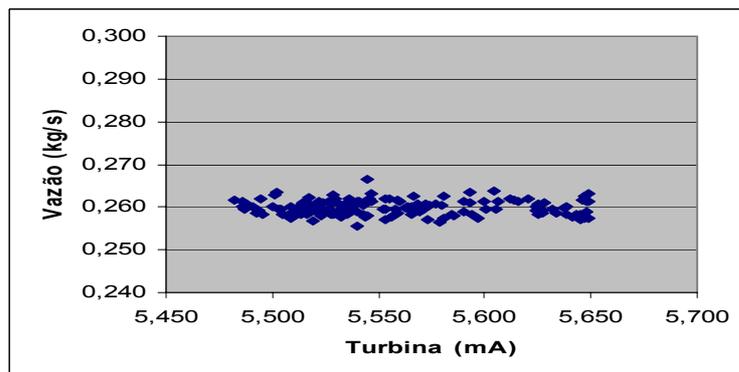


Figura 19: 1 leitura a cada 5 segundos

Analisando os gráficos, concluímos que as leituras do medidor de vazão tipo turbina devem ser feitas a cada 4 segundos, pois com esse intervalo de leitura conseguimos uma dispersão menor que $\pm 0,005$ kg/s.

4º Passo – Usar os pontos \bar{V}_i e $(T_{urb})_i$ para ajustar a curva do gráfico da vazão em função do sinal de saída da turbina, segundo as equações:

$$\bar{V}_i = K * T_{urb} \quad (90)$$

$$K = \frac{\sum \bar{V}_i \bar{T}_{urb}}{\sum (\bar{T}_{urb})^2} \quad (91)$$

$$s = u_{Ajuste} = \left(\frac{\sum \bar{V}_i - K \bar{T}_{urb}}{n - 1} \right)^{1/2} \quad (92)$$

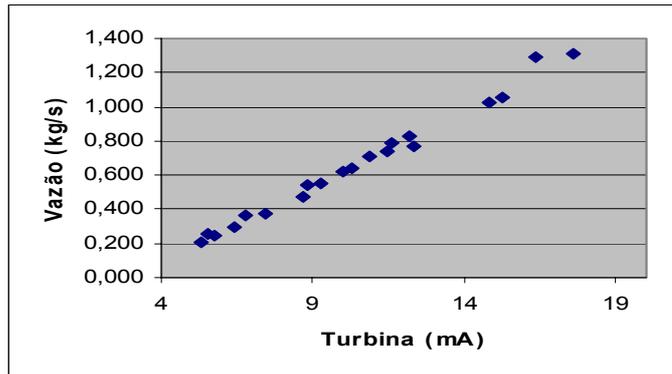


Figura 20: Curva de calibração do medidor de vazão tipo turbina

5º Passo – Para o cálculo da incerteza do medidor de vazão tipo turbina, devemos medir sua rotação (mA) e utilizar a equação abaixo:

$$u^2 = u_{\bar{v}}^2 + u_{Ajuste}^2 + u_{Turb}^2 \quad (93)$$

3.5.5 Considerações

Levando-se em consideração que o volume de água deslocado é igual ao volume de ar deslocado, temos então a eq. (95), para calcularmos a densidade do ar.

Supondo um gás ideal, temos a seguinte equação:

$$Pv = nRt \quad (94)$$

Desenvolvendo a eq. (94), temos a seguinte equação para o cálculo da densidade:

$$\rho = \frac{p}{Rt} \Rightarrow \rho = \frac{p + p_{atm}}{R(t + 273,15)} \quad (95)$$

$$R = \frac{\bar{R}}{Meq} \quad (96)$$

onde:

$$M_{eq} = 28,29$$

$$\bar{R} = 8314,5 \text{ J/kmol.K}$$

Logo: $R = 287 \text{ J/kg.K}$ (constante do gás)

Considerando uma pressão de 5,0 bar e uma temperatura de 20 °C para o ar que passou pelo medidor de vazão tipo turbina, a densidade do ar nestas condições, foi 7,147 J/kg.K, conforme eq. (95).

A vazão em massa é diretamente proporcional a pressão e inversamente proporcional á temperatura na sucção. Além disto, é também diretamente proporcional á pressão e inversamente proporcional a raiz quadrada da temperatura na admissão da turbina [Fontoura, 2001]. Portanto:

$$m \propto \frac{p_s}{t_s} \propto \frac{p_a}{\sqrt{t_a}} \quad (97)$$

Onde m é a vazão em massa, p_s e t_s são a pressão e a temperatura absolutas na sucção do compressor, e p_a e t_a a pressão e a temperatura absolutas na admissão da turbina.

A hipótese relativa às condições na sucção pode ser investigada, mais profundamente, considerando-se primeiro a equação da continuidade:

$$m = V * \rho \quad (98)$$

onde V é a vazão volumétrica, e ρ a densidade do ar.

Combinando a eq. (94) com a eq. (98), temos:

$$p = \frac{m}{V} t R \quad (99)$$

Aplicando-se as condições de referência (tabela 1) a uma condição qualquer na entrada do compressor, tem-se respectivamente:

$$p_{Ref} = \frac{m_{Ref}}{V_{Ref}} * t_{Ref} R$$

$$p_a = \frac{m_a}{V_a} * t_a R$$

Como $V_{Ref} = V_a$, as duas últimas relações podem ser combinadas para fornecer:

$$m_a = \left(\frac{m_{ref} t_{Ref}}{P_{Ref}} \right) \frac{p_a}{t_a} \quad (100)$$

3.5.6

Resultados Obtidos

Através da eq. (91), calculamos o valor do coeficiente K em 0,066. Partindo deste valor efetuamos a análise das incertezas. Todos os valores podem ser vistos em uma planilha de cálculo do EXCEL, mostrada na tabela abaixo. Valores encontrados:

$$u_{\text{Ajuste}} = 0,96 \%$$

$$u_{\text{Turb}} = 0,44 \%$$

Através da eq. (93), calculamos a incerteza do medidor de vazão tipo turbina em 1,1 %.

Tabela 15: Calibração do medidor de vazão tipo turbina

Turbina (mA)	Vazão (kg/s)	Desvio Padrão (%)	u_{Turb} (%)	$V \times T_{\text{urb}}$	T_{urb}^2	KT_{urb}	$(V-KT_{\text{urb}})^2$
5,293	0,203	0,0071	0,004	1,074	28,016	0,350	0,022
5,557	0,260	0,0093	0,005	1,445	30,880	0,368	0,012
5,759	0,248	0,0081	0,004	1,426	33,166	0,381	0,018
6,377	0,297	0,0064	0,003	1,896	40,666	0,422	0,016
6,760	0,363	0,0094	0,005	2,452	45,698	0,448	0,007
7,426	0,377	0,0048	0,002	2,802	55,145	0,492	0,013
8,651	0,469	0,0034	0,002	4,058	74,840	0,573	0,011
8,810	0,539	0,0389	0,019	4,747	77,616	0,583	0,002
9,278	0,548	0,0046	0,002	5,084	86,081	0,614	0,004
9,958	0,618	0,0029	0,001	6,156	99,162	0,659	0,002
10,257	0,639	0,0085	0,004	6,553	105,206	0,679	0,002
10,844	0,714	0,0083	0,004	7,747	117,592	0,718	0,000
11,467	0,741	0,0030	0,002	8,492	131,492	0,759	0,000
11,612	0,791	0,0090	0,005	9,180	134,839	0,769	0,000
12,152	0,825	0,0077	0,004	10,024	147,671	0,804	0,000
12,307	0,766	0,0106	0,005	9,422	151,462	0,815	0,002
14,783	1,026	0,0015	0,001	15,167	218,537	0,979	0,002
15,216	1,052	0,0049	0,002	16,011	231,527	1,007	0,002
16,349	1,289	0,0254	0,013	21,072	267,290	1,082	0,043
17,561	1,316	0,0016	0,001	23,104	308,389	1,163	0,023
			Σ	157,911	2385,275		0,182