



COMISSÃO TÉCNICA DE VAZÃO CT-13
Dicla – Divisão de Acreditação de Laboratórios
Cgcre – Coordenação Geral de Acreditação

**RELATÓRIO FINAL DO 2º PROGRAMA DE COMPARAÇÃO
INTERLABORATÓRIAL DE PITOMETRIA EM CAMPO**

Data de emissão: 02 de Julho de 2020

Resumo

O presente relatório apresenta o desenvolvimento e os resultados obtidos no 2º Programa de Comparação Interlaboratorial de Pitometria em campo ou, simplesmente, 2º PI de Pitometria, organizado e realizado no âmbito da Subcomissão do Programa Interlaboratorial em Velocidade de Fluidos da CT-13 Comissão de Assessoramento às Atividades de Acreditação da Cgcre do Inmetro.

Esse programa foi concebido em 14.08.2019, na 34ª reunião da Comissão Técnica de Vazão CT-13 e finalizado em 02.07.2020. Contou com a participação dos laboratórios de pitometria das empresas Conaut Controles Automáticos Ltda., Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – Sabesp, Companhia de Saneamento de Minas Gerais – Copasa / Unidade de BH, Companhia de Saneamento de Minas Gerais – Copasa / Unidade de Ubá e Sagatech Brasil.

Como local para a realização das medições de vazão de água por meio da técnica de pitometria, a subcomissão decidiu pela utilização da unidade da Sabesp situada à Rua Franklin do Amaral, nº 1281, no bairro da Vila Nova Cachoeirinha, na cidade de São Paulo/SP. No local existe instalado um medidor de vazão do tipo eletromagnético, da marca Fisher/Rosemount, modelo 570TM50004SSF4A2V, diâmetro 500 mm. A comparação foi realizada nas vazões nominais de 150 L/s, 350 L/s e 500 L/s indicadas pelo medidor eletromagnético.

A análise do conjunto dos resultados obtidos nas comparações mostrou que, não obstante a expressiva maioria dos laboratórios tenha conseguido demonstrar comparabilidade de suas medidas em relação aos valores de referência, ocorreram diferenças importantes entre os valores apresentados pelos seis laboratórios, indicando a necessidade de novas investigações visando aprimorar a aplicação da técnica de pitometria, especialmente para melhoria da reproduzibilidade e das incertezas de medida dos laboratórios.

Palavras-chave: pitometria, pitometria em campo, medição de vazão, macromedidor de água, calibração de medidor de vazão, comparação interlaboratorial.

Sumário

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVO.....	2
3.	PARTICIPANTES.....	3
4.	VALOR DE REFERÊNCIA.....	3
5.	METODOLOGIA.....	4
6.	RESULTADOS.....	11
7.	CÁLCULO DO VALOR REFERÊNCIA.....	13
8.	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	16
9.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	18
10.	EQUIPE TÉCNICA.....	19
11.	BIBLIOGRAFIA.....	19

1. INTRODUÇÃO

Durante a 34^a reunião da Comissão Técnica de Vazão CT-13, realizada em 14.08.2019, um grupo composto por representantes de laboratórios que atuam no setor de saneamento, se reuniram e estabeleceram as condições básicas para o desenvolvimento do 2º Programa de Comparação Interlaboratorial de Pitometria em campo ou, simplesmente, 2º PI de Pitometria.

Na ocasião, foi decidido pelo grupo que o Sr. Luiz Francisco Marcon Ribeiro, representante da Dicla na Comissão, seria o responsável pela compilação dos resultados da comparação e desidentificação dos laboratórios participantes do PI.

Nessa mesma reunião, foi agendada a segunda reunião do referido grupo para o dia 18.09.2019 e, também, definida esta data como prazo limite para a inscrição de eventuais novos participantes.

Na 35^a reunião da Comissão Técnica de Vazão CT-13, realizada em 18.09.2019, o grupo responsável pelo 2º PI de Pitometria definiu o Eng.^o Valmir Ruiz como coordenador do programa, os laboratórios participantes e o local onde seriam executadas as medições.

Os participantes inscritos no programa foram dois laboratórios acreditados pela Cgcre do Inmetro na área de calibração de medidores de vazão volumétrica de água (Conaut Controles Automáticos Ltda. e IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo) e quatro laboratórios postulantes à acreditação (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – Sabesp, Companhia de Saneamento de Minas Gerais – Copasa / Unidade BH, Companhia de Saneamento de Minas Gerais – Copasa / Unidade Ubá e pela empresa Sagatech do Brasil).

Para a realização das medições, a Sabesp ofereceu as mesmas instalações utilizadas para a realização das medições do 1º PI de pitometria, localizadas à Rua Franklin do Amaral, nº 1281, no bairro da Vila Nova Cachoeirinha, na cidade de São Paulo/SP. No local, existe instalado em uma tubulação de 20 polegadas de diâmetro, um medidor de vazão do tipo eletromagnético da marca Fisher/Rosemount, modelo 570TM50004SSF4A2V que deveria ser o medidor a ser calibrado pelos laboratórios. O grupo definiu que a calibração do medidor deveria ser realizada nas vazões de 150 L/s, 350 L/s e 500 L/s.

O presente relatório apresenta os resultados obtidos pelos laboratórios participantes do programa e uma avaliação dos resultados.

2. OBJETIVO

Este 2º PI de Pitometria visou aprimorar a metodologia aplicada no 1º PI de Pitometria, programa piloto desenvolvido em 2018-2019, incorporando algumas modificações e melhorias no procedimento. Nesse sentido, os principais objetivos deste programa de comparação interlaboratorial foram:

- (a) avaliar e comparar o desempenho metrológico dos laboratórios participantes, especificamente no serviço de calibração de medidores de vazão volumétrica de água por meio da técnica de Pitometria em campo;
- (b) fornecer subsídios que possibilitem aos laboratórios participantes implementar melhorias em

seu sistema de gestão da qualidade, notadamente no serviço relacionado à calibração foco desse programa;

- (c) identificar possíveis questões técnicas de interesse dos laboratórios participantes, ou mesmo de aplicação no âmbito geral da Comissão, buscando sanar lacunas comuns, harmonizar práticas metrológicas, além de gerar conhecimentos e experiências que possam ser aplicados nas próximas comparações interlaboratoriais.

3. PARTICIPANTES

As informações dos laboratórios participantes deste programa são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Laboratórios participantes do 2º PI de Pitometria.

Nome do laboratório	Endereço	Representante	Número da acreditação
Centro de Metrologia Mecânica, Elétrica e de Fluidos - IPT/CTMetro	Av. Prof. Almeida Prado, 532 - Prédio 37 – São Paulo / SP CEP: 05508-901	Valmir Ruiz - valmir@ipt.br (11) 3767-4756	CAL 162
Laboratório de Vazão e Nível - Conaut Embú	Estrada Louis Pasteur, 230 - Embu das Artes / SP CEP: 06835-701	Caio Andrade Braga caio.braga@conautrj.com.br (11) 4785-2810//4785-2700	CAL 168
Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo – Sabesp	Rua Sumidouro, 448 – São Paulo / SP CEP: 05428-010	Olavo Alberto Prates Sachs osachs@sabesp.com.br (11) 3388-8770	Postulante
Companhia de Saneamento de Minas Gerais – Copasa / Unidade BH	Rua Mar de Espanha, 453 – Belo Horizonte / MG CEP: 30330-900	Claudinei Paes Claudinei.Paes@copasa.com.br (31) 3250-1415	Postulante
Companhia de Saneamento de Minas Gerais – Copasa / Unidade Ubá	Av. Quintino Poggiali Gasparoni, 441 – Ubá / MG CEP: 36505-146	Aguimar José Borges Aguimar.borges@copasa.com.br (32) 3539-6034	Postulante
Sagatech Brasil	Av. Luiz Antônio Monteiro, 1370 Esplanada Bocaiúva / MG CEP: 39390-000	Rodrigo Pires rodrigo.pires@sagatechbrasil.com.br (38) 3251-2204	Postulante

4. VALOR DE REFERÊNCIA

Foi definido que nesse 2º PI de Pitometria o valor de referência para cada vazão de água de comparação seria o valor médio obtido a partir das medidas de todos os laboratórios participantes.

5. METODOLOGIA

A comparação interlaboratorial foi baseada na realização por cada laboratório participante da calibração, em três vazões diferentes, de um mesmo medidor de vazão de água por princípio eletromagnético, instalado em uma tubulação de transporte de água da concessionária Sabesp.

O método de calibração utilizado pelos laboratórios foi o da determinação da vazão de referência por meio da técnica de pitometria, que consiste no levantamento do perfil de velocidades do escoamento de água através de um conjunto de pontos determinados ao longo de dois diâmetros (*traverses*) ortogonais da seção transversal da tubulação (denominada seção de pitometria) utilizando-se um tubo de Pitot do tipo Cole e transmissores de pressão diferencial, realizadas por meio de comunicação *Hart* com a planilha eletrônica de mapeamento.

5.1. Medidor de vazão de água calibrado

A Tabela 2 apresenta dados do medidor de vazão de água do tipo eletromagnético calibrado e das suas condições operacionais.

Tabela 2. Dados do medidor calibrado e das suas condições operacionais.

Medidor tipo	Fabricante	Modelo	Vazão máxima (L/s)	Vazão mínima (L/s)	Diâmetro nominal (mm)	Pressão nominal (mca)
Eletromagnético	Fisher-Rosemount	570TM50004SSF4A2V	1 200	150	500	15

Em série ao medidor de vazão, encontravam-se instalados dois *taps* de pitometria, um na geratriz superior e outro na lateral da tubulação. A Figura 1, a seguir, apresenta um corte transversal da caixa de pitometria com as principais dimensões utilizadas pelos laboratórios para a escolha do tubo de Pitot utilizado na calibração.

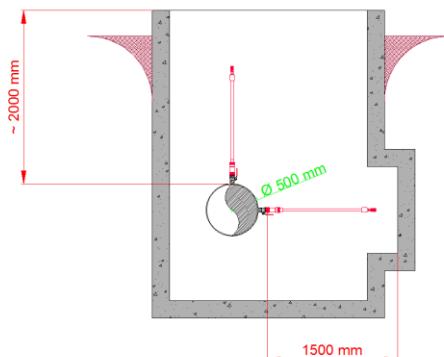


Figura 1. Corte transversal da caixa de pitometria e da tubulação.

Para a execução dos serviços de calibração do medidor, a Sabesp autorizou o livre acesso ao local para as equipes dos laboratórios participantes deste programa nas datas programadas.

5.2. Fator K de configuração do medidor

Em função da dificuldade de se encontrar um profissional com vínculo independente para a configuração do fator K do medidor calibrado com um valor incógnito aos participantes, a subcomissão do programa decidiu manter o seu valor original. Dessa forma, o valor do fator K configurado no medidor foi **Tube cal: 1109554810000001**.

Nenhum laboratório participante do programa foi autorizado a realizar qualquer tipo de alteração ou intervenção nos parâmetros de configuração do medidor, assim como, foi definido que o mesmo não deveria sofrer qualquer ajuste ou modificação física ou eletroeletrônica.

5.3. Procedimento de calibração

À exceção dos requisitos e parâmetros especificamente definidos neste documento, cada laboratório foi orientado a utilizar o seu próprio método adotado no seu procedimento de calibração que foi o objeto desta comparação interlaboratorial.

5.4. Vazões de calibração

O medidor de vazão eletromagnético foi calibrado nas três seguintes vazões da sua faixa de operação:

- 150 L/s (velocidade nominal da ordem de 0,76 m/s)
- 350 L/s (velocidade nominal da ordem de 1,78 m/s)
- 500 L/s (velocidade nominal da ordem de 2,55 m/s)

O resultado em cada vazão de calibração foi o valor obtido pelo mapeamento realizado pelo laboratório nos *traverses* vertical e horizontal.

As vazões de operação do medidor durante a sua calibração foram mantidas estáveis e não ocorreram flutuações na vazão que excedessem em $\pm 5\%$ dos valores definidos anteriormente.

O medidor de vazão foi calibrado em relação ao seu sinal de saída em corrente elétrica na faixa de 4 mA a 20 mA.

A operação controle e regulagem das vazões de calibração foram executadas pela equipe da Sabesp, responsável pela operação da unidade onde se encontra instalado o medidor. Essa mesma equipe se responsabilizou por indicar ao laboratório participante o ponto de aquisição do sinal de saída do medidor eletromagnético que foi calibrado.

No local das medições, foi disponibilizado pela Sabesp um ponto de fornecimento de energia elétrica de 127 V ou 220 V, em 60 Hz, para alimentação da instrumentação utilizada pelos participantes da comparação.

Além das medições normais realizadas por cada laboratório nas três vazões (150 L/s, 350 L/s e 500 L/s), no ponto de vazão de 350 L/s o medidor foi calibrado utilizando um tubo de Pitot de referência, o qual foi utilizado por todos os participantes da comparação. O objetivo desse procedimento foi avaliar possíveis influências nos resultados da comparação decorrentes da

utilização de tubos de Pitot diferentes pelos laboratórios e com coeficientes de calibração diferentes.

O IPT forneceu, na forma de empréstimo, o tubo de Pitot de referência, que ficou sob a guarda da Sabesp, que o entregou a cada laboratório no dia das suas medições, juntamente com uma cópia do seu certificado de calibração. Os valores constantes do certificado foram utilizados nos cálculos da vazão medida por cada laboratório para a vazão de 350 L/s. Todos os participantes utilizaram o TIP A do tubo de Pitot direcionado para medição da pressão total do escoamento, tanto no *traverse* vertical quanto no *traverse* horizontal, para padronizar a metodologia.

O tubo de Pitot de referência foi devolvido para a Sabesp ao término das medições por cada laboratório e ao final de todas as medições, o tubo de Pitot foi devolvido ao IPT pela Sabesp.
Observação: Nenhuma avaria foi constatada no Pitot de referência.

5.5. Parâmetro de comparação

O parâmetro de comparação utilizado neste programa foi o erro percentual da medida fornecida pelo medidor eletromagnético em cada vazão de calibração determinado pelo laboratório, conforme definido pela expressão (1):

$$E_{lab\ i} = \frac{Q_{medidor} - Q_{lab\ i}}{Q_{lab\ i}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

onde:

- $E_{lab\ i}$: erro percentual da medida do medidor eletromagnético determinado pelo laboratório i onde $i = 1, 2, \dots, n$, em %.
- $Q_{medidor}$: vazão indicada pelo medidor eletromagnético durante a sua calibração pelo laboratório i onde $i = 1, 2, \dots, n$, em L/s.
- $Q_{lab\ i}$: vazão de referência medida pelo laboratório i onde $i = 1, 2, \dots, n$, em L/s.
- n : número total de laboratórios participantes da comparação para a vazão específica de calibração.

5.6. Definição do valor de referência

Para cada uma das três vazões de comparação, os valores de referência para o parâmetro de comparação foram estabelecidos por meio do valor obtido pela média aritmética dos resultados declarados por cada um dos laboratórios participantes. Ou seja:

$$E_{ref} = \frac{E_{lab1} + E_{lab2} + \dots + E_{labn}}{n} \quad (2)$$

onde:

- E_{ref} : erro percentual de referência para a vazão de calibração sob comparação, em %.
- $E_{lab\ i}$: erro percentual da medida do medidor eletromagnético determinado pelo laboratório i onde $i = 1, 2, \dots, n$, em %.
- n : número total de laboratórios participantes da comparação para a vazão específica de calibração.

5.7. Outliers

No programa foram utilizados todos os valores declarados pelos laboratórios participantes, independentemente do método de medição utilizado. Não obstante, foi aplicado o teste de *Grubbs* (considerando um nível de significância de 5 %) para a exclusão de valores eventualmente discrepantes, denominados de *outliers*.

O teste de *Grubbs* detecta *outliers* de distribuições normais. Os dados testados são geralmente os valores mínimo e máximo. O resultado é uma probabilidade que indica que os dados pertencem à população principal. Se a amostra investigada tiver alguma outra distribuição, especialmente assimétrica, (por exemplo, lognormal), então esse teste dará resultado falso.

O teste é baseado na diferença da média da amostra e nos dados mais extremos considerando o desvio padrão (*Grubbs*, 1950, 1969; DIN 32645; DIN 38402).

O teste pode detectar um *outlier* de cada vez com probabilidades diferentes (consultar a tabela a seguir) de um conjunto de dados com distribuição normal assumida.

Tabela 3. Valores críticos para o teste de *Grubbs*.
Grubbs' critical value table:

N	0.1	0.075	0.05	0.025	0.01
3	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
4	1.42	1.44	1.46	1.48	1.49
5	1.6	1.64	1.67	1.71	1.75
6	1.73	1.77	1.82	1.89	1.94
7	1.83	1.88	1.94	2.02	2.1
8	1.91	1.96	2.03	2.13	2.22
9	1.98	2.04	2.11	2.21	2.32
10	2.03	2.1	2.18	2.29	2.41

O procedimento de aplicação do teste de *Grubbs* consiste basicamente no seguinte:

a) ordenar os valores em ordem crescente, isto é:

$$X_1 < X_2 < X_3 < \dots < X_{n-1} < X_n$$

b) supor como hipótese que o menor valor, X_1 , ou o maior valor, X_n pode ser considerado como valor *outlier*;

c) calcular a média \bar{X} e o desvio padrão s de todo o conjunto de valores;

d) calcular o valor de T_{min} ou T_{max} da seguinte forma:

$$T_{min} = \frac{\bar{X} - X_1}{s} \quad \text{ou} \quad T_{max} = \frac{X_n - \bar{X}}{s} \quad (3)$$

onde:

X_1 ou X_n	: é o <i>outlier</i> suspeito
\bar{X}	: valor médio de todo o conjunto de dados
s	: desvio padrão de todo o conjunto de dados

- e) selecionar o risco desejado de falsa rejeição (ex.: $\alpha = 0,05$);
- f) comparar o valor calculado de T_{min} ou T_{max} com o valor tabelado (Tabela 3). Se o valor de T_{min} ou de T_{max} for maior que o valor tabelado, a rejeição pode ser feita considerando-se o risco associado.

5.8. Incerteza associada ao valor de referência

O valor da incerteza padrão combinada associada ao valor de referência para cada vazão calibrada foi determinado de acordo com a seguinte expressão:

$$u_{c\ ref} = \sqrt{(u_{dve})^2 + (u_{cxi})^2} \quad (4)$$

onde:

- $u_{c\ ref}$: incerteza padrão combinada associada ao valor do erro percentual de referência (E_{ref}) considerando uma distribuição de probabilidades do tipo normal.
- u_{dve} : incerteza que considera a dispersão dos valores de erro ($E_{lab\ i}$) reportados pelos n laboratórios (excluindo-se eventual *outlier*). É obtida a partir do cálculo do desvio padrão da média dos valores de erro reportados pelos laboratórios considerando uma distribuição de probabilidades do tipo normal e dividida por raiz de n . Ou seja: $u_{dve} = s(E_{lab\ i}) / \sqrt{n}$.
- u_{cxi} : incerteza que considera as incertezas associadas aos valores de erro ($E_{lab\ i}$) reportados pelos laboratórios (excluindo-se eventual *outlier*). É obtida a partir da raiz quadrada da soma dos quadrados das incertezas padronizadas reportadas pelos laboratórios e dividida por raiz de n . Ou seja:

$$u_{cxi} = \sqrt{(u_{lab1})^2 + (u_{lab2})^2 + \dots + (u_{labn})^2} / \sqrt{n} \quad (5)$$

Determinada a incerteza padrão associada ao valor de referência para cada vazão calibrada, a incerteza expandida será calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$U_{ref} = u_{c\ ref} \cdot k \quad (6)$$

- U_{ref} : é a incerteza expandida associada ao valor do erro percentual de referência (E_{ref}).
- $u_{c\ ref}$: é a incerteza padrão combinada associada ao valor de referência, considerando uma distribuição de probabilidades do tipo normal.
- k : fator de abrangência para um nível da confiança de 95,45 %, sendo que, para a incerteza associada ao valor de referência, se adotará um fator $k = 2$.

5.9. Parâmetro de análise

Para a avaliação dos resultados declarados pelos laboratórios participantes, foi utilizado como parâmetro o Erro Normalizado (EN) que é dado pela expressão:

$$EN = \frac{E_{labi} - E_{ref}}{\sqrt{(U_{labi})^2 + (U_{ref})^2}} \quad (7)$$

onde:

E_{ref} : erro percentual de referência para a vazão de calibração sob comparação, em %.

E_{labi} : erro percentual da medida fornecida pelo medidor eletromagnético, determinado pelo laboratório i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), em %.

U_{labi} : incerteza expandida associada ao resultado apresentado pelo laboratório i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), em %.

U_{ref} : incerteza expandida associada ao valor de referência, em %.

O resultado obtido por cada laboratório será considerado satisfatório quando $|EN| \leq 1$ e insatisfatório quando $|EN| > 1$.

5.10. Sequência de laboratórios

Os laboratórios participantes tiveram cada um, dois dias para a realização da calibração do medidor e seguiram à seguinte sequência: Conaut, Sagatech, Copasa – BH, Copasa – Ubá, Sabesp, Sagatech e IPT.

5.11. Cronograma

A Figura 2 mostra o cronograma das medições em campo.

CRONOGRAMA DO 2º PROGRAMA INTERLABORATORIAL EM PITOMETRIA							
	Outubro 2019	Novembro 2019	Dezembro 2019			Janeiro 2020	
Calibração em Campo	Dias 30 e 31	Dias 13, 14	Dias 04 e 05	Dias 11 e 12	Dias 18 e 19	Dia 08	Dias 15 e 16
IPT							
Sabesp							
Conaut							
Sagatech		(*)					
Copasa / BH							
Copasa / Ubá							

(*) A Sagatech não conseguiu finalizar as medições por problemas operacionais e agendou para dia 8/1/2020 a data para concluir

Figura 2. Cronograma das medições em campo

6. RESULTADOS

Os laboratórios foram desidentificados pelo representante da Dicla na CT-13, o Sr. Luiz Francisco Marcon Ribeiro e receberam os códigos: LAB P44, LAB P61, LAB P64, LAB P78, LAB P84 e LAB P96. Os resultados das calibrações do medidor de vazão de cada um desses laboratórios estão apresentados nas Tabelas 4 a 9, a seguir.

Tabela 4. Resultados da calibração realizada pelo LAB P44.

Q_n (L/s)	$Q_{medidor}$ (L/s)	Q_{lab} (L/s)	E_{lab} (%)	U_{lab} (%)	$s_{(lab)}^I$ (%)	$k_{(lab)}$
150	148,05	153,20	-3,36	2,6	0,25	2,00
350	343,70	352,15	-2,40	2,2	0,22	2,00
500	493,25	510,50	-3,38	2,2	0,19	2,00
350 (*)	348,95	360,90	-3,30	2,3	0,22	2,00

(*) Resultados obtidos com o tubo de Pitot de referência.

Diâmetro interno da tubulação medido (*traverse vertical*): 490 mm

Diâmetro interno da tubulação medido (*traverse horizontal*): 491 mm

Tabela 5. Resultados da calibração realizada pelo LAB P61.

Q_n (L/s)	$Q_{medidor}$ (L/s)	Q_{lab} (L/s)	E_{lab} (%)	U_{lab} (%)	$s_{(lab)}^I$ (%)	$k_{(lab)}$
150	157,00	150,00	5,00	2,2	1,00	2,00
350	352,00	355,00	-0,92	2,2	0,18	2,00
500	503,00	516,00	-2,53	2,2	1,16	2,00
350 (*)	357,00	369,00	-3,09	2,1	0,17	2,00

(*) Resultados obtidos com o tubo de Pitot de referência.

Diâmetro interno da tubulação medido (*traverse vertical*): 490 mm

Diâmetro interno da tubulação medido (*traverse horizontal*): 490 mm

Tabela 6. Resultados da calibração realizada pelo LAB P64.

Q_n (L/s)	$Q_{medidor}$ (L/s)	Q_{lab} (L/s)	E_{lab} (%)	U_{lab} (%)	$s_{(lab)}^I$ (%)	$k_{(lab)}$
150	154,10	155,21	-0,72	1,93	0,11	2,00
350	350,60	358,40	-2,20	1,81	0,12	2,00
500	510,90	532,80	-4,10	1,84	0,08	2,00
350 (*)	356,00	362,50	-1,80	1,99	0,27	2,00

(*) Resultados obtidos com o tubo de Pitot de referência.

Diâmetro interno da tubulação medido (*traverse vertical*): 491 mm

Diâmetro interno da tubulação medido (*traverse horizontal*): 488 mm

Tabela 7. Resultados da calibração realizada pelo LAB P78.

Q_n (L/s)	$Q_{medidor}$ (L/s)	Q_{lab} (L/s)	E_{lab} (%)	U_{lab} (%)	$s_{(lab)}^I$ (%)	$k_{(lab)}$
150	152,90	156,00	-1,70	2,40	0,06	2,00
350	346,90	345,00	0,50	1,90	0,09	2,00
500	502,40	514,00	-2,30	2,20	0,08	2,00
350 (*)	356,00	356,00	-0,10	2,30	0,06	2,00

(*) Resultados obtidos com o tubo de Pitot de referência.

Diâmetro interno da tubulação medido (*traverse vertical*): 487,5 mm

Diâmetro interno da tubulação medido (*traverse horizontal*): 488,0 mm

Tabela 8. Resultados da calibração realizada pelo LAB P84.

Q_n (L/s)	$Q_{medidor}$ (L/s)	Q_{lab} (L/s)	E_{lab} (%)	U_{lab} (%)	$s_{(lab)}^I$ (%)	$k_{(lab)}$
150	143,89	143,4	0,34	3,70	0,24	2,00
350	341,73	338,2	1,04	2,10	0,65	2,00
500	501,86	497,2	0,94	3,20	1,21	2,00
350 (*)	344,49	345,9	-0,41	2,17	0,60	2,00

(*) Resultados obtidos com o tubo de Pitot de referência.

Diâmetro interno da tubulação medido (*traverse vertical*): 489,0 mm

Diâmetro interno da tubulação medido (*traverse horizontal*): 490,0 mm

Tabela 9. Resultados da calibração realizada pelo LAB P96.

Q_n (L/s)	$Q_{medidor}$ (L/s)	Q_{lab} (L/s)	E_{lab} (%)	U_{lab} (%)	$s_{(lab)}^I$ (%)	$k_{(lab)}$
150	150,50	148,00	1,60	3,60	0,08	2,00
350	355,40	367,00	-3,20	1,80	0,10	2,00
500	510,70	524,00	-2,50	1,90	0,07	2,00
350 (*)	355,30	363,00	-2,20	1,90	0,07	2,00

(*) Resultados obtidos com o tubo de Pitot de referência.

Diâmetro interno da tubulação medido (*traverse vertical*): 489,0 mm

Diâmetro interno da tubulação medido (*traverse horizontal*): 490,0 mm

Legenda:

Q_n : vazão nominal de calibração, em L/s
 $Q_{medidor}$: vazão indicada pelo medidor, em L/s

Q_{lab}	: vazão medida pelo laboratório por meio da pitometria, em L/s
E_{lab}	: erro de medida do medidor calibrado, determinado pelo laboratório, em L/s
U_{lab}	: incerteza expandida, determinada pelo laboratório, em %
$s_{(lab)}$: desvio padrão experimental da média, determinada pelo laboratório, em %
$k_{(lab)}$: fator de abrangência k (ou t_{st}) utilizado no cálculo da incerteza expandida

Na Figura 3 é apresentado o gráfico dos erros de medida do medidor eletromagnético calibrado, levantado pelos seis laboratórios nas três vazões de calibração. Valores obtidos com a utilização pelos laboratórios de seus próprios tubos de Pitot.

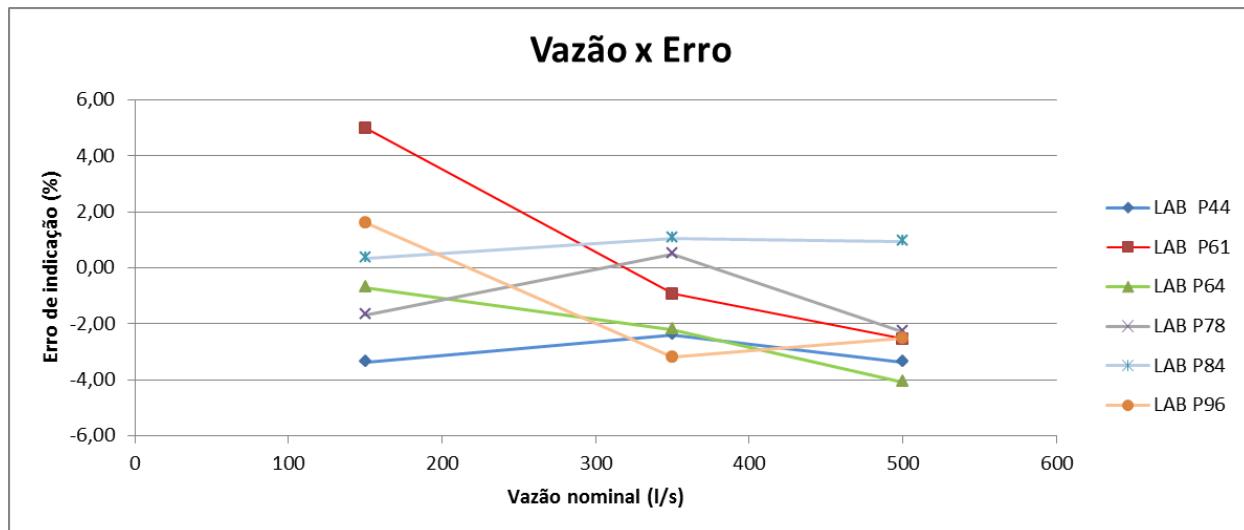


Figura 3. Gráfico com os erros de medida do medidor eletromagnético calibrado.

Na Figura 4 é apresentado o gráfico dos erros de medida do medidor eletromagnético calibrado, levantados pelos seis laboratórios apenas no ponto de vazão de 350 L/s. Valores obtidos com a utilização do mesmo tubo de Pitot de referência por todos os laboratórios.

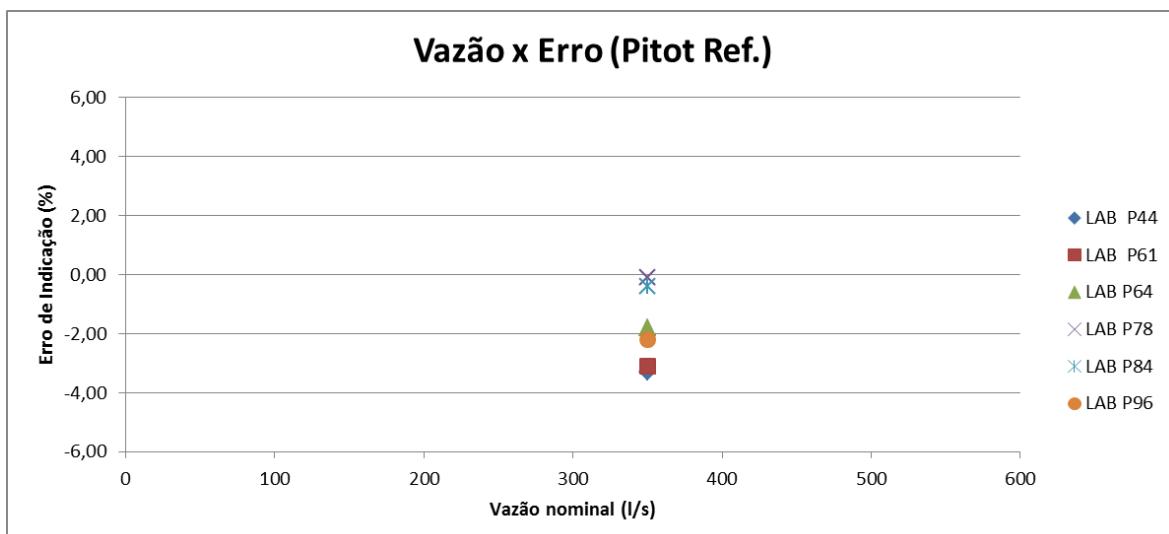


Figura 4. Gráfico com os erros de medida do medidor eletromagnético calibrado obtidos pelos seis laboratórios com a utilização do mesmo tubo de Pitot de referência.

Na Figura 5 é apresentado o gráfico dos erros de indicação em função da vazão de calibração apenas no ponto de vazão de 350 L/s, valores obtidos utilizando o tubo de Pitot de referência, e os valores obtidos utilizando o tubo de Pitot próprio por cada participante.

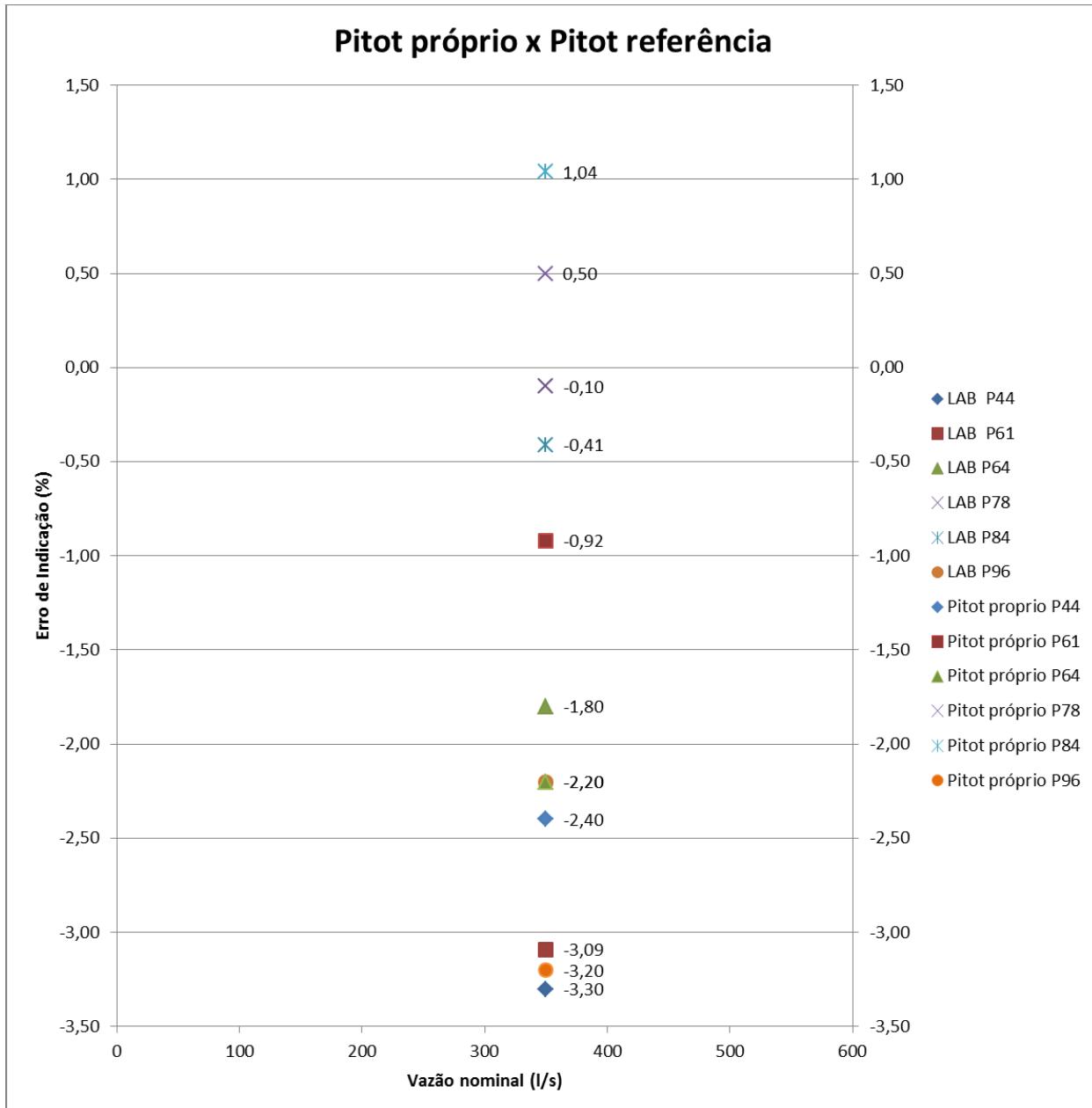


Figura 5. Gráfico comparativo com os erros de medida do medidor eletromagnético calibrado obtidos pelos seis laboratórios com a utilização dos tubos de Pitot próprio e o de referência.

Na Figura 6 é apresentado o gráfico das diferenças dos erros de medida do medidor eletromagnético calibrado por cada laboratório no ponto de vazão de 350 L/s, entre os valores obtidos utilizando o tubo de Pitot de referência e os valores obtidos utilizando o tubo de Pitot próprio de cada participante.

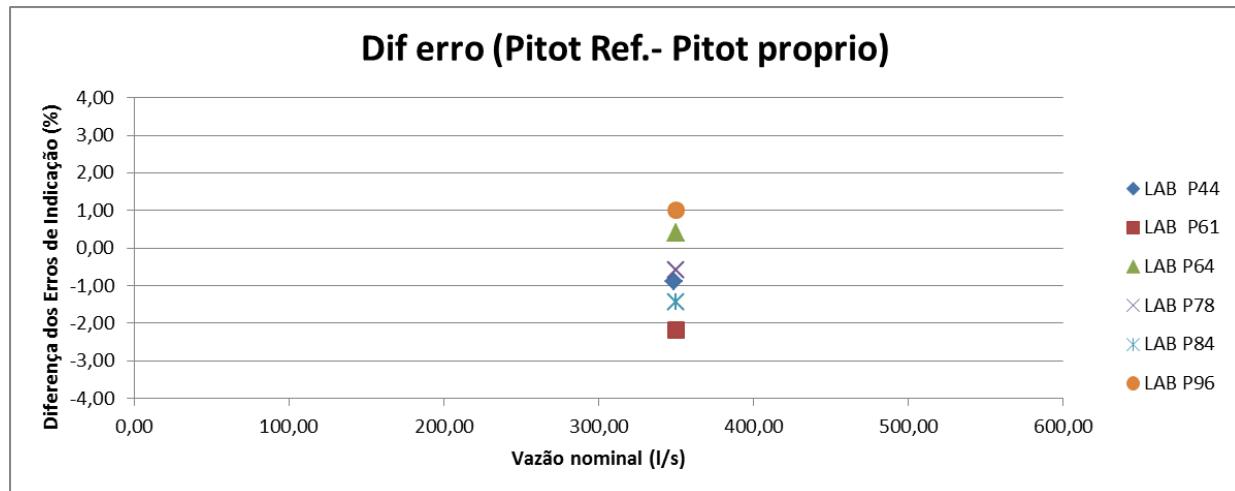


Figura 5. Gráfico das diferenças dos erros de medida do medidor eletromagnético entre os valores obtidos utilizando o tubo de Pitot de referência e o tubo de Pitot próprio.

7. CÁLCULO DO VALOR DE REFERÊNCIA

Neste item são apresentados os resultados dos testes de *Grubbs* e do valor de referência. Foram utilizados todos os valores declarados pelos laboratórios participantes, independentemente do método de medição utilizado. Não obstante, foi utilizado o teste de *Grubbs*, considerando um nível de significância de 5 %, para a exclusão de valores eventualmente discrepantes (*outliers*).

7.1. Teste de *Grubbs*

A Tabela 8 mostra a aplicação do teste de *Grubbs* para a vazão de 150 L/s.

Tabela 8. Resultados das calibrações realizadas na vazão de 150 L/s e teste de *Grubbs*.

Vazão	150 L/s	
	Laboratório	Erro (%)
LAB P44	-3,36	1,30
LAB P61	5,00	1,10
LAB P64	-0,72	0,97
LAB P78	-1,70	1,20
LAB P84	0,34	1,85
LAB P96	1,60	1,80

Teste de <i>Grubbs</i>		
Média dos erros	0,19	%
Desvio padrão dos erros	2,90	%
Erro máximo	5,00	%
Erro mínimo	-3,36	%
Referência de <i>Grubbs</i> para $n = 6$ e 5 % ($a = 0,05$)	1,82	
Teste de Erro máximo (T_{max})	1,22	aceito
Teste de Erro mínimo (T_{min})	1,66	aceito

Assim, na vazão de 150 L/s, todos os valores foram considerados válidos e todos foram utilizados para o cálculo do valor de referência.

A Tabela 9 mostra a aplicação do teste de *Grubbs* para a vazão de 350 L/s.

Tabela 9. Resultados das calibrações realizadas no ponto de 350 L/s e teste de *Grubbs*.

Vazão	350 L/s	
	Laboratório	Erro (%)
LAB P44	-2,40	1,10
LAB P61	-0,92	1,10
LAB P64	-2,20	0,91
LAB P78	0,50	0,95
LAB P84	1,04	1,05
LAB P96	-3,20	0,90

Teste de <i>Grubbs</i>		
Média dos erros	-1,20	
Desvio padrão dos erros	1,70	
Erro máximo	1,04	
Erro mínimo	-3,20	
Referência de <i>Grubbs</i> para $n = 6$ e 5 % ($a = 0,05$)	1,82	
Teste de Erro máximo (T_{max})	1,32	aceito
Teste de Erro mínimo (T_{min})	1,18	aceito

Assim, na vazão de 350 L/s, todos os valores foram considerados válidos e todos foram utilizados para o cálculo do valor de referência.

A Tabela 10 mostra a aplicação do teste de *Grubbs* para a vazão de 500 L/s.

Tabela 10. Resultados das calibrações realizadas no ponto de 500 L/s teste de *Grubbs*.

Vazão	500 L/s	
Laboratório	Erro (%)	Incerteza u (%)
LAB P44	-3,38	1,10
LAB P61	-2,53	1,10
LAB P64	-4,10	0,92
LAB P78	-2,30	1,10
LAB P84	0,94	1,6
LAB P96	-2,50	0,95

Teste de <i>Grubbs</i>		
Média dos erros		-2,31
Desvio padrão dos erros		1,73
Erro máximo		0,94
Erro Mínimo		-4,10
Referência de Grubbs para $n = 6$ e 5 % ($a = 0,05$)		1,82
Teste de Erro máximo (T_{max})		1,88 não aceito
Teste de Erro mínimo (T_{min})		1,03 aceito

Assim, na vazão de 500 L/s, o erro máximo de indicação não foi considerado um valor válido. Dessa forma, o mesmo foi excluído e refeito o cálculo para a obtenção do novo valor de referência.

A Tabela 11 mostra a aplicação do teste de *Grubbs* para o ponto de 500 L/s, com a exclusão do valor de erro máximo de 0,94 % (do LAB P84).

Tabela 11. Resultados das calibrações realizadas no ponto de 500 L/s teste de *Grubbs* com o valor de erro máximo excluído.

Vazão	500 L/s	
Laboratório	Erro (%)	Incerteza u (%)
LAB P44	-3,38	1,10
LAB P61	-2,53	1,10
LAB P64	-4,10	0,92
LAB P78	-2,30	1,10
LAB P84		
LAB P96	-2,50	0,95

Teste de <i>Grubbs</i>		
Média dos erros	-2,96	
Desvio padrão dos erros	0,76	
Erro máximo	-2,30	
Erro Mínimo	-4,10	
Referência de <i>Grubbs</i> para $n = 5$ e 5 % ($\alpha = 0,05$)	1,67	
Teste de Erro máximo (outlier máx.)	0,87	aceito
Teste de Erro mínimo (outlier min.)	1,50	aceito

Assim, na vazão de 500 L/s, dos seis resultados apresentados, foram considerados válidos apenas cinco resultados válidos para o cálculo do valor de referência.

7.2. Cálculo do valor de referência

As Tabelas 12, 13, e 14 mostram os valores de referência e suas respectivas incertezas para as vazões de 150 L/s, 350 L/s e 500 L/s, respectivamente.

Tabela 12. Cálculo do valor de referência para a vazão de 150 L/s.

Cálculo do valor de referência para a vazão de 150 L/s			
E_{ref}	0,19	%	Média dos erros de medida determinados pelos laboratórios
u_{dve}	1,19	%	Desvio padrão experimental da média
u_{cxi}	1,41	%	Composição das incertezas dos laboratórios
u_{ref}	1,84	%	Composição da incerteza do desvio padrão com a incerteza das calibrações
U_{ref}	3,68	%	Incerteza expandida do valor de referência considerando $k = 2$

Tabela 13. Cálculo do valor de referência para a vazão de 350 L/s.

Cálculo do valor de referência para a vazão de 350 L/s			
E_{ref}	-1,20	%	Média dos erros de medida determinados pelos laboratórios
u_{dve}	0,69	%	Desvio padrão experimental da média
u_{cxi}	1,00	%	Composição das incertezas dos laboratórios
u_{ref}	1,22	%	Composição da incerteza do desvio padrão com a incerteza das calibrações
U_{ref}	2,44	%	Incerteza expandida do valor de referência considerando $k = 2$

Tabela 14. Cálculo do valor de referência para a vazão de 500 L/s.

Cálculo do valor de referência para a vazão de 500 L/s			
E_{ref}	-2,96	%	Média dos erros de medida determinados pelos laboratórios
u_{dve}	0,34	%	Desvio padrão experimental da média
u_{cxi}	1,04	%	Composição das incertezas dos laboratórios
u_{ref}	1,09	%	Composição da incerteza do desvio padrão com a incerteza das calibrações
U_{ref}	2,18	%	Incerteza expandida do valor de referência considerando $k = 2$

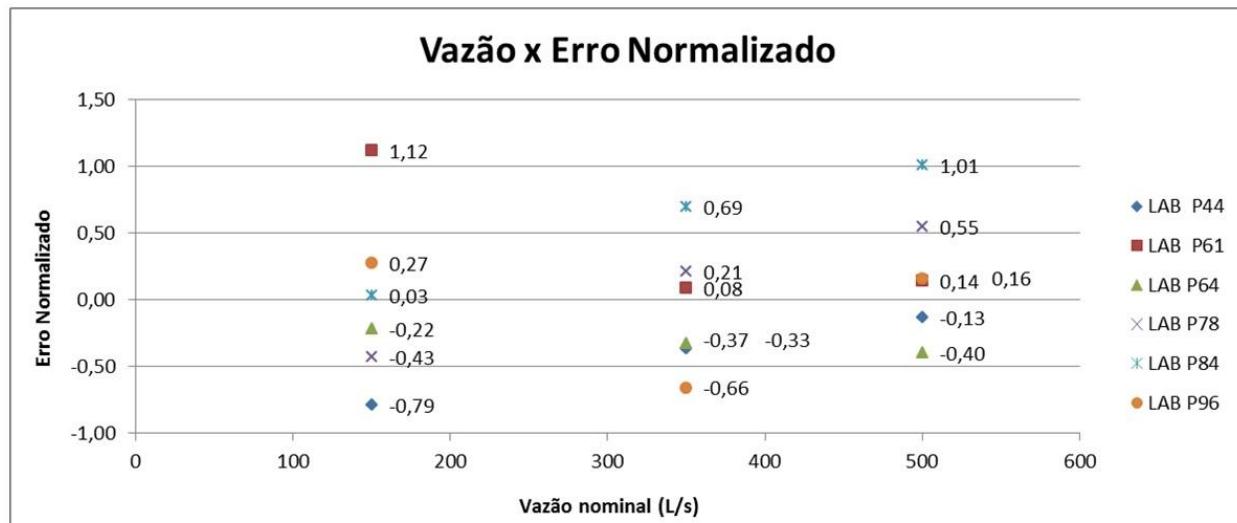
8. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na Tabela 15 são apresentados os erros de medida do medidor calibrado em cada vazão e obtidos por cada laboratório e suas respectivas incertezas expandidas associadas, os valores dos erros de referência e as respectivas incertezas expandidas de referência calculadas para cada vazão conforme apresentados no item 7 (Teste de *Grubbs*) e, finalmente, os valores dos erros normalizados (*EN*) calculados obtidos por cada laboratório conforme o item 5.9.

Tabela 15. Resultados dos Erros Normalizados.

Código do Laboratório	Q_n (L/s)	E_{lab} (%)	E_{ref} (%)	U_{lab} (%)	U_{ref} (%)	EN
LAB P44	150	-3,36		2,60		-0,79
LAB P61	150	5,00		2,20		1,12
LAB P64	150	-0,72		1,93		-0,22
LAB P78	150	-1,70	0,19	2,40	3,68	-0,43
LAB P84	150	0,34		3,70		0,03
LAB P96	150	1,60		3,60		0,27
LAB P44	350	-2,40		2,20		-0,37
LAB P61	350	-0,92		2,20		0,08
LAB P64	350	-2,20		1,81		-0,33
LAB P78	350	0,50	-1,20	1,90	2,44	0,55
LAB P84	350	1,04		2,10		0,69
LAB P96	350	-3,20		1,80		-0,66
LAB P44	500	-3,38		2,20		-0,13
LAB P61	500	-2,53		2,20		0,14
LAB P64	500	-4,10		1,84		-0,40
LAB P78	500	-2,30	-2,96	2,20	2,18	0,21
LAB P84	500	0,94		3,20		1,01
LAB P96	500	-2,50		1,90		0,16

Na Figura 6 são apresentados de forma gráfica os Erros Normalizados obtidos pelos seis laboratórios nas três vazões de calibração.

**Figura 6.** Gráfico dos Erros Normalizados obtidos pelos seis laboratórios nas três vazões de calibração.

Na Tabela 16 são apresentados os valores dos diâmetros internos da tubulação na seção de pitometria medidos pelos laboratórios nos eixos vertical e horizontal, o diâmetro médio medido por cada laboratório, o diâmetro médio geral, o cálculo da área da seção transversal interna da tubulação e a amplitude dessas medidas.

Tabela 16. Resultado das medições dos diâmetros internos da tubulação.

Laboratórios	Diâmetro vertical	Diâmetro horizontal	Diâmetro médio	Área	Diferença da área em relação à média
	(mm)			(m ²)	(%)
LAB P44	490,0	491,0	490,5	0,188959	0,43
LAB P61	490,0	490,0	490,0	0,188574	0,22
LAB P64	491,0	488,0	489,5	0,188189	0,02
LAB P78	487,5	488,0	487,8	0,186846	-0,70
LAB P84	489,0	490,0	489,5	0,188189	0,02
LAB P96	489,0	490,0	489,5	0,188189	0,02
			Média	0,188158	
Máximo	491,0	491,0	Máximo	0,188959	
Mínimo	487,5	488,0	Mínimo	0,186846	
Amplitude (mm)	3,5	3,0	Amplitude (%)	1,13	

9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma primeira análise dos resultados obtidos neste 2º PI de Pitometria é feita com base nas três vazões de operação do medidor eletromagnético calibrado mostraram evidências importantes. Na vazão de 350 L/s, os resultados obtidos pelos seis laboratórios participantes da comparação foram todos considerados satisfatórios, com Erro Normalizado menor que a unidade ($EN \leq 1$). Ou seja, nessa vazão, todos os laboratórios apresentaram resultados consistentes entre as calibrações realizadas, levando-se em consideração os valores das incertezas expandidas de medida declaradas pelos mesmos. Nesta vazão, mediante análise dos resultados apresentados pelos laboratórios participantes, não foram constatados *outliers*, tendo sido possível utilizar todos os resultados obtidos pelos laboratórios.

Por sua vez, na vazão de 150 L/s, dentre os resultados apresentados pelos laboratórios, apenas cinco foram considerados satisfatórios com $EN \leq 1$. Nessa vazão, o laboratório de código LAB P61 obteve um $EN = 1,12$, o que significa um resultado insatisfatório. Da mesma forma que ocorreu na vazão de 350 L/s, não foram constatados *outliers* entre os resultados apresentados pelos laboratórios participantes.

Finalmente, na vazão de 500 L/s, a maioria dos resultados obtidos pelos laboratórios pôde ser considerada satisfatória, com erros normalizados abaixo de 0,40. Apenas o laboratório de código LAB P84 obteve um valor de $EN = 1,01$, muito embora bastante próximo do limite unitário estabelecido no protocolo da comparação. Nesta vazão de 500 L/s, por meio da aplicação do teste de *Grubbs*, foi constatado um resultado classificado como *outlier*, exatamente o valor reportado pelo laboratório LAB P84, o qual foi descartado para o cálculo do valor de referência.

Embora a grande maioria dos resultados obtidos na comparação interlaboratorial tenha sido satisfatória para a quase totalidade dos laboratórios, constatou-se a ocorrência de uma diferença significativa entre os valores apresentados pelos seis laboratórios e uma dispersão alta dos resultados, repetindo de certa forma as características dos resultados obtidos no 1º PI de Pitometria. Com efeito, os resultados dos erros de medida do medidor eletromagnético calibrado, determinados pelos seis laboratórios e apresentados na Figura 3, mostraram uma dispersão significativa nas três vazões de calibração de 150 L/s, 350 L/s e 500 L/s, com amplitudes de 8,36 %, 4,24 % e 5,04 %, respectivamente. A maior dispersão dos resultados na vazão de 150 L/s poderia ter como justificativa a maior dificuldade de medição de uma pressão diferencial de valor relativamente reduzido nessa condição de operação do tubo de Pitot.

Uma ação importante para esclarecer grande parte das dúvidas decorrentes dessa dispersão significativa dos resultados obtidos pelos diferentes laboratórios seria a retirada o medidor eletromagnético de vazão do local de operação e o seu envio a um laboratório de calibração acreditado a fim de determinar, em bancada de laboratório e com uma menor incerteza, os erros de medida nas vazões calibradas nesse programa. Isso permitiria determinar, com um maior nível de confiabilidade, os valores de referência nas três vazões de calibração e, assim, avaliar melhor o desempenho dos laboratórios participantes do programa.

Frente a esses resultados, caberá ao grupo de laboratórios uma análise e discussão posterior sobre possíveis melhorias que poderiam ser implementadas, principalmente para elaboração de um próximo programa de comparação interlaboratorial nesse tipo de serviço.

Uma outra consideração a ser feita está relacionada ao uso de um tubo de Pitot de referência. Nesse 2º PI de Pitometria, foi investigado o efeito da utilização de um mesmo tubo de Pitot de

referência por todos os laboratórios. Os gráficos apresentados nas Figuras 3 e 4, com os erros de medida do medidor eletromagnético calibrado no ponto de vazão de 350 L/s, indicaram que as diferenças passaram de até 4,24 %, para o caso dos laboratórios utilizando seus próprios tubos de Pitot, para até 3,20 %, para o caso do uso de um mesmo tubo de Pitot de referência. Ou seja, de fato foi possível constatar uma melhoria na dispersão dos resultados, justificando a necessidade de uma investigação mais profunda sobre a rastreabilidade das medidas decorrentes da calibração dos tubos de Pitot. Porém, evidenciou-se também que esta não é a única causa das diferenças entre os resultados dos seis laboratórios uma vez que as diferenças entre os resultados continuaram a ser significativas, mesmo com o uso de um mesmo tubo de Pitot de referência.

Outra consideração: uma análise dos valores dos diâmetros internos da tubulação na seção de pitometria medidos pelos laboratórios nos eixos vertical e horizontal, apresentados na Tabela 16, indicou diferenças de até 3,5 mm nos diâmetros internos verticais e de até 3,0 mm nos horizontais e de até 1,13 % nas áreas das seções transversais do conduto medidas pelos laboratórios. Essa variabilidade dos valores das áreas das seções transversais do conduto determinadas pelos laboratórios é responsável em parte pelas diferenças dos resultados apresentados na Figura 3. Uma possível causa dessas diferenças nos diâmetros medidos pode ser, entre outras, a eventual existência de incrustações nas superfícies internas do conduto que acabaram dificultando a medição do diâmetro pelos laboratórios com o uso do cílibre. Essa inspeção das condições internas da tubulação na seção de pitometria poderia eventualmente ser feita na ocasião da retirada do medidor de vazão para envio ao laboratório para calibração.

Deve ser ressaltado também que, na execução deste programa de comparação interlaboratorial, não foi realizado o estudo de estabilidade do artefato sob calibração, no caso o medidor eletromagnético de vazão da marca Fisher/Rosemount, modelo 570TM50004SSF4A2V. Dessa forma, assumiu-se por hipótese que o medidor apresentou desempenho metrológico estável durante o período de realização das medições do programa. Com o envio do medidor de vazão para a calibração em laboratório seria possível determinar, ao menos, a característica de repetibilidade das medidas nas três vazões de calibração.

Uma observação importante, esta direcionada principalmente aos avaliadores dos laboratórios acreditados pela Cgcre, refere-se à necessidade de análise de compatibilidade das incertezas expandidas associadas aos valores de referência (U_{ref}) e das incertezas de medida expandidas declaradas pelos laboratórios participantes da comparação interlaboratorial (U_{lab}) em relação aos valores das CMCs constantes dos escopos de acreditação de cada laboratório. Ou seja, é importante evidenciar que as incertezas expandidas associadas aos valores de referência e as incertezas expandidas declaradas associadas aos resultados apresentados pelo laboratório na comparação interlaboratorial sejam compatíveis com a CMC acreditada. O motivo é que incertezas expandidas associadas aos valores de referência e aos resultados apresentados pelo laboratório que sejam muito maiores que o valor da CMC acreditada, acabam favorecendo (reduzindo) o valor do erro normalizado obtido pelo laboratório na comparação, tornando inócua a comparação. Na ocasião do desenvolvimento desse programa, os dois laboratórios acreditados pela Cgcre do Inmetro na área de calibração de medidores de vazão volumétrica de água, Conaut Controles Automáticos Ltda. e IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, possuíam as CMCs de 2,2 % e 1,99 %, respectivamente.

Com relação aos demais laboratórios participantes do programa, caso venham a solicitar a acreditação de seus serviços de calibração de medidores de vazão de água pela Cgcre, é necessário que no processo de avaliação, o avaliador analise os resultados obtidos pelo laboratório nesta comparação, tanto em termos das capacidades de medição de vazão, quanto das

incertezas de medida associadas aos resultados apresentados neste relatório.

11. BIBLIOGRAFIA

- [1] “EAL-P7” Interlaboratory Comparisons - *European Cooperation for Accreditation of Laboratories Committee*, 2,1th Edition, March 1996.
- [2] Mikan, B., Valenta, T. [PTB, CMI], *Final Report – Draft B, Inter-laboratory calibration comparison of the turbine gas meter G6500 EURAMET Project No. 1006*, March 2009.
- [3] Orientações para a organização de comparações interlaboratoriais pelas comissões técnicas da DICLA-DOQ-CGCRE-005, *Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial*, Revisão 00, September 2002.
- [4] COOMET Proyect 219 level
- [5] ABNT NBR ISO 3966: Medição de Vazão em condutos fechados – Método velocimétrico utilizando tubos de Pitot estático
- [6] Andriotti, J.L.S. *Técnicas estatísticas aplicáveis a tratamento de informações oriundas de procedimentos laboratoriais*, CPRM, 2005.
- [7] ISO 13528 *Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparison*, 2015.
- [8] NIE-CGCRE-045, Operação dos comitês técnicos de assessoramento à Cgcre na acreditação de organismos de avaliação da conformidade, revisão 06, junho/2018.

São Paulo, 02 de julho de 2020.

De acordo:

**Instituto de Pesquisas
Tecnológicas do Estado de São
Paulo - IPT**

**Conaut Controles Automáticos
Ltda.**

**Companhia de Saneamento
Básico do Estado de São Paulo
– Sabesp**

**Companhia de Saneamento de
Minas Gerais – Copasa
Unidade BH**

**Companhia de Saneamento de
Minas Gerais – Copasa
Unidade Ubá**

Sagatech Brasil