

Manual Orientativo para Calibração de Macromedidores de Vazão de Água por meio da Técnica de Pitometria



AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS
E SANEAMENTO BÁSICO

República Federativa do Brasil

Jair Bolsonaro

Presidente da República

Ministério do Desenvolvimento Regional

Rogério Simonetti Marinho

Ministro

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

Diretoria Colegiada

Christianne Dias Ferreira (Diretora-Presidente)

Ricardo Medeiros de Andrade

Oscar Cordeiro de Moraes Netto

Marcelo Cruz

Vitor Saback

Secretaria Geral (SGE)

Rogério de Abreu Menescal

Procuradoria-Federal (PF/ANA)

Luis Carlos Martins Alves Junior

Corregedoria (COR)

Maurício Abijaodi Lopes de Vasconcellos

Auditoria Interna (AUD)

Eliomar Ayres da Fonseca Rios

Chefia de Gabinete (GAB)

Thiago Serrat

Gerência Geral de Estratégia (GGES)

Nazareno Marques de Araújo

Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos (SPR)

Flávio Hadler Tröger

Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica Nacional (SGH)

Marcelo Jorge Medeiros

Superintendência de Tecnologia da Informação (STI)

Fábio Fernando Borges

Superintendência de Apoio ao Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SAS)

Humberto Cardoso Gonçalves

Superintendência de Implementação de Programas e Projetos (SIP)

Tibério Magalhães Pinheiro

Superintendência de Regulação (SRE)

Patrick Thadeu Thomas

Superintendência de Operações e Eventos Críticos (SOE)

Joaquim Guedes Corrêa Gondim Filho

Superintendência de Fiscalização (SFI)

Alan Vaz Lopes

Superintendência de Administração, Finanças e Gestão de Pessoas (SAF)

Luís André Muniz

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
Ministério do Desenvolvimento Regional

MANUAL ORIENTATIVO PARA CALIBRAÇÃO DE MACROMEDIDORES DE VAZÃO DE ÁGUA POR MEIO DA TÉCNICA DE PITOMETRIA

Brasília/DF

ANA

2021

© 2021, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA)

Setor Policial Sul, Área 5, Quadra 3, Blocos B, L, M, N, O e T. CEP 70610-200, Brasília/DF

PABX: (61) 2109 5400 / (61) 2109-5252

Endereço eletrônico: www.ana.gov.br

Comitê de Editoração

Diretor

Ricardo Medeiros de Andrade

Superintendentes:

Humberto Cardoso Gonçalves

Joaquim Guedes Correa Gondim Filho

Sergio Ayrimoraes Soares

Secretário Executivo

Rogério de Abreu Menescal

Revisão dos originais

Alan Vaz Lopes

Marcus Vinícius Araújo Mello de Oliveira

Josimar Alves de Oliveira

Sergio Ricardo Toledo Salgado

Othon Fialho de Oliveira

Elaboração

Rubens Silva Telles (Chefe da Seção de Óleo e Gás - CTMetro)

Nilson Massami Taira (Diretor do CTMetro)

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. - IPT

Centro de Metrologia Mecânica, Elétrica e de Fluidos - CTMetro

Avenida Professor Almeida Prado, 532 -

Prédio 37 - 05508-901 - Butantã -

São Paulo / SP

Tel.: (11) 3767-4756

E-mail: ctmetro@ipt.br

Projeto gráfico e diagramação

Gráfica Movimento

Todos os direitos reservados.

É permitida a reprodução de dados e de informações contidos nesta publicação, desde que citada a fonte.

Catálogo na fonte: CEDOC/BIBLIOTECA

A265m

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil).

Manual orientativo para calibração de macromedidores de vazão de água por meio da técnica de pitometria / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. – Brasília: ANA, 2021.

152 p. il.

ISBN: 978-65-88101-09-4 (Digital)

1. Vazão - Medição. I. Título.

Elaborada por Fernanda Medeiros – CRB-1/1864

RESUMO

A medição da vazão de água em condutos de grandes dimensões sempre foi um desafio para as empresas que necessitam quantificar com confiabilidade os volumes de água captados, produzidos ou transportados por seus sistemas hidráulicos.

Embora existam disponíveis no mercado diferentes tecnologias de medição de vazão, para assegurar a manutenção da sua confiabilidade metrológica esses medidores de vazão necessitam ser avaliados e calibrados de acordo com uma periodicidade determinada pelos requisitos e critérios de cada aplicação específica. No entanto, devido às dificuldades operacionais e logísticas envolvidas, a calibração em laboratório desses chamados macromedidores de vazão não tem se mostrado uma solução técnica e economicamente viável.

Considerando as questões preocupantes apresentadas, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT desenvolveu uma metodologia para a medição da vazão de água em condutos de grandes dimensões que se baseia na técnica fundamental da pitometria, utilizando o tubo de Pitot do tipo Cole para mapear os perfis de velocidade do escoamento nas seções da tubulação de interesse e permitir o cálculo da vazão.

Com base nos resultados obtidos em um grande número de aplicações em condutos fechados de água bruta e tratada, junto às instalações de captação, transporte e distribuição de água, a técnica fundamental e auditável da pitometria tem se mostrado uma ferramenta bastante apropriada para a validação de medidas de vazão de água em tubulações de grande diâmetro. De fato, a técnica de pitometria permite a calibração dos macromedidores de vazão dentro das periodicidades e critérios técnicos definidos pelos usuários ou estabelecidas em contratos ou regulamentos metrológicos, sem a necessidade de remover o medidor de vazão do seu local de operação em campo.

Este manual orientativo foi preparado com o objetivo de apresentar a metodologia de medição de vazão de água por pitometria desenvolvida pelo IPT. No manual são apresentados os fundamentos teóricos envolvidos, os procedimentos práticos e os cuidados necessários à aplicação da técnica, além da instrumentação e dos *softwares* utilizados. O leitor notará que as abordagens teóricas foram restringidas ao mínimo necessário, até pelo fato de serem facilmente acessíveis em qualquer livro de Hidráulica. Ao invés disso, foram enfatizados os procedimentos importantes e necessários para a prática da pitometria.

O Manual encontra-se dividido em tópicos com os seguintes conteúdos: Introdução; Métodos de calibração de macromedidores de vazão; A técnica de pitometria; Planejamento da calibração; Calibração em campo; Casos especiais e Estimativa de incertezas.

Sugestões e críticas são bem-vindas e certamente serão de extrema valia para as revisões futuras deste documento.

O presente trabalho foi desenvolvido no âmbito do Contrato Nº 073/2017/ANA firmado entre a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. – IPT.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DE MACROMEDIDORES DE VAZÃO.....	12
2.1	Calibração de medidores de vazão em laboratório	12
2.2	Calibração de macromedidores de vazão por pitometria	13
2.3	Calibração de um macromedidor de vazão de água em campo	14
3	A TÉCNICA DE PITOMETRIA.....	16
3.1	O desenvolvimento da pitometria no Brasil.....	18
3.2	O tubo de Pitot do tipo Cole atual.....	20
3.3	Calibração do tubo de Pitot do tipo Cole.....	21
3.4	Levantamento do perfil de velocidades do escoamento	23
3.5	Cálculo da vazão volumétrica.....	25
3.6	Esquema da instrumentação.....	26
4	PLANEJAMENTO DA CALIBRAÇÃO	28
4.1	<i>Checklist</i> para avaliação das instalações e configurações do medidor a ser calibrado e da estação de pitometria	28
4.2	Avaliação da instalação do elemento primário do macromedidor de vazão	35
4.3	Avaliação da instalação e configuração do elemento secundário.....	36
4.3.1	Avaliação da instalação do elemento secundário	36
4.3.2	Avaliação da configuração do elemento secundário	37
4.4	Instalação da estação pitométrica	38
4.4.1	Descrição do tap comercial.....	38
4.4.2	Alternativa ao tap comercial	39
4.4.3	Cuidados com a instalação do tap	40
4.4.4	Tipos de instalação de taps	41
4.4.5	Escolha do local de instalação da estação pitométrica.....	41
4.4.6	Características operacionais da estação pitométrica	43
4.4.7	Procedimento para a instalação do tap	43
4.4.8	Cuidados na instalação conforme o material da tubulação.....	44
4.4.9	Operação da máquina Mueller	45
4.4.10	Construção da caixa abrigo da estação pitométrica.....	50
4.5	Escolha das vazões de calibração	52
4.6	Configuração da instrumentação do kit de pitometria	54
4.6.1	O kit de pitometria	54
4.6.2	Configuração.....	55
4.7	Calibração da instrumentação	78
4.8	Integração da instrumentação via software	80
4.9	Arranjos físicos elétricos da instrumentação.....	90
4.10	Medição do diâmetro interno da tubulação	92
4.11	Distância do centro do tip à extremidade inferior do tubo de Pitot.....	96
4.12	Convenção sobre o lado do tubo de Pitot do tipo Cole	97

4.13	Cálculo das posições do ponto extremo do tubo de Pitot	98
5	CALIBRAÇÃO EM CAMPO	101
5.1	Avaliação das instalações e configurações do macromedidor	102
5.1.1	Checklist	102
5.1.2	Avaliações	102
5.2	Definição das vazões de calibração	103
5.3	Preparo da instrumentação e do <i>kit</i> de pitometria	103
5.4	Realização da calibração em campo	104
5.4.1	Instalação	104
5.4.2	Sequência de calibração	106
5.5	Análise dos resultados	126
5.6	Observações sobre a aplicação da técnica de pitometria	129
6	CASOS ESPECIAIS	130
6.1	Calibração de medidores de vazão de água sem sinal de saída (medidores proporcionais – <i>Shunt</i> e Woltmann)	130
6.1.1	Calibração de medidores proporcionais (<i>Shunt</i>)	131
6.1.2	Calibração de medidores do tipo Woltmann	132
6.1.3	Avaliação de dados de calibração	132
6.1.4	Uso da planilha de pitometria para medidor proporcional ou Woltmann	134
6.2	Calibração de medidores de vazão de água diâmetros menores que 200 mm	137
7	ESTIMATIVA DE INCERTEZAS DE MEDIDA NA PITOMETRIA	142
7.1	Introdução	142
7.2	Referências sobre estimativa de incertezas de medida	143
7.3	Definições sobre estimativa de incertezas de medida	143
7.4	Cálculo da vazão medida por meio da técnica de pitometria	144
7.5	Estimativa da incerteza de medida	145
7.5.1	Fontes de incerteza	146
7.5.2	Quantificação das fontes de incerteza	147
	REFERÊNCIAS	151

1-INTRODUÇÃO

Por razões técnicas e econômicas, a medição confiável da vazão de água em tubulações de grandes diâmetros tem sido um desafio para os operadores de sistemas captação e abastecimento de água que todos os dias necessitam captar, transportar e distribuir quantidades cada vez maiores deste insumo para atender às diferentes aplicações nas áreas de saneamento básico, de irrigação ou mesmo industrial [1]. A **Figura 1** ilustra exemplos de usos da água nesses setores.



Figura 1. Exemplos de usos da água nas áreas de saneamento básico, de irrigação e industrial.

A busca pela confiabilidade metrológica é também um desafio para os fabricantes de medidores de vazão que são estimulados a oferecer soluções cada vez mais inovadoras para essa demanda metrológica, muitas vezes envolvendo operações comerciais e, principalmente, de integridade e segurança hídrica.

Nas últimas décadas, sustentado no desenvolvimento de sensores, processadores eletrônicos de sinais e *softwares*, foi possível testemunharmos o surgimento de novas tecnologias de medição de vazão de água para essas aplicações. Como ilustrado na **Figura 2**, surgiram inicialmente os medidores de vazão do tipo eletromagnético de corpo integral ou de carretel, hoje amplamente utilizados nos setores industrial e de saneamento; depois, os medidores de vazão ultrassônicos por tempo de trânsito e, mais recentemente, os medidores com sondas de inserção por diferentes princípios, todos eles propostos como alternativas para substituição dos antigos medidores de vazão por pressão diferencial, como o conhecido tubo de Venturi e suas diversas variações construtivas.



Fonte: <http://usautomationlab.com.pk>

Medidor eletromagnético do tipo carretel



Fonte: <https://www.rshydro.fr/>

Medidor do tipo ultrassônico por tempo de trânsito



Eletromagnético



Turbina



Mássico térmico



Vórtice

Fonte: www.bellflowsystems.co.uk

Figura 2. Exemplos de tecnologias de medição de vazão de água.

Esses desenvolvimentos têm sido induzidos pela necessidade cada vez maior de automação e controle dos processos de medição de vazão de água, associados à crescente exigência de aumento da confiabilidade das medidas, notadamente para viabilizar a gestão metrológica, a melhoria da eficiência energética e o controle de perdas nos sistemas hidráulicos.

Apesar do processo de modernização dos sistemas de medição de vazão utilizados pelas empresas de água estar em constante evolução, o que se tem verificado na prática é o surgimento de uma série de questões decorrentes da aplicação dessas novas tecnologias nas diferentes situações. Com efeito, os seguintes desafios merecem menção:

- a dificuldade de recalibração dos macromedidores de vazão de acordo com a periodicidade estabelecida nos procedimentos internos, contratos ou regulamentos metrológicos ainda necessita ser resolvida. A remoção de um medidor de vazão de grandes dimensões e peso do seu local de operação no campo e o envio para um laboratório de calibração é, na maioria dos casos, técnica e economicamente impraticável;
- os sistemas de aquisição e tratamento de sinais nesses medidores utilizam eletrônicas e *softwares* proprietários que são difíceis de serem auditados e validados sob a perspectiva da Metrologia Legal, comprometendo a transparência e a confiabilidade dos resultados das medições de vazão, sendo observados inclusive, em alguns casos, a utilização de correlações validadas em laboratório com tubulações de diâmetro muito inferior ao da aplicação;

- devido às grandes dimensões do conduto, alguns tipos de medidores de vazão utilizam a técnica da amostragem de velocidades do escoamento apenas em um ponto específico da seção transversal da tubulação (caso dos medidores de inserção) ou apenas em uma ou duas trajetórias através do escoamento (caso dos medidores ultrassônicos por tempo de trânsito), inferindo a vazão da água com base nessas amostras de velocidade, desconsiderando a possibilidade de ocorrência de escoamentos com perfis de velocidade assimétricos ou com a presença de escoamentos helicoidais, fenômenos bastante comuns em aplicações de campo e conhecidos como notórios indutores de erros de medida;
- os critérios considerados pelos usuários na implementação de sistemas de medição de vazão de água em tubulações de grandes dimensões geralmente levam em conta apenas os valores do investimento inicial, sem avaliar os custos de operação do medidor, sem garantir a disponibilidade de peças de reposição e de serviços de assistência técnica e sem assegurar a rastreabilidade metrológica dos resultados da medição durante os muitos anos de operação do medidor.

Envolto nessas questões, os setores industriais, de saneamento básico e de irrigação possuem um grande parque de medidores de vazão de água de grandes dimensões instalados, também conhecidos como macromedidores de vazão. Esses medidores são fundamentais para a execução de várias funções importantes dentro de seus respectivos sistemas, tais como:

- o controle das operações de captação, tratamento e abastecimento de água (**Figura 3**);
- a gestão da rede de transporte e distribuição;
- a determinação dos índices de perdas;
- a quantificação de volumes transferidos ou vendidos para terceiros.



Fonte: www.yumpu.com/en/

Figura 3. A medição de vazão em sistemas de abastecimento de água.

Esses medidores de vazão, também conhecidos como macromedidores, permitem que as empresas dos setores mencionados possam operar e controlar seus sistemas de distribuição de água, conhecer quanto captam das fontes (rios, mananciais e poços) e também avaliar a sua eficiência operacional, em especial na questão das perdas de água. Dessa forma, a confiabilidade das medidas de vazão obtidas com o uso

dos macromedidores é de fundamental importância para o gerenciamento das atividades dessas empresas.

A **Figura 4** ilustra a operação de instalação de um macromedidor (azul claro) em uma adutora de água, situação em que é possível evidenciar as dificuldades envolvidas na manipulação de um equipamento de grandes dimensões no campo.



Fonte: www.saaesorocaba.com.br

Figura 4. Instalação de um macromedidor de água em adutora.

Para obter o controle eficaz das medições realizadas com o uso de macromedidores de vazão é fundamental determinar os seus parâmetros de desempenho metrológico, tais como erros de medida, incertezas de medida associadas e rastreabilidade metrológica, o que é possível somente por meio de uma calibração confiável, conduzida de acordo com uma metodologia auditável e tecnicamente validada.

Considerando as questões preocupantes apresentadas, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT desenvolveu uma metodologia para a medição da vazão de água em condutos de grandes dimensões que se baseia na técnica fundamental da pitometria, utilizando o tubo de Pitot do tipo Cole para mapear os perfis de velocidades do escoamento nas seções da tubulação de interesse e permitir, assim, o cálculo da vazão.

Com base nos resultados obtidos em um grande número de aplicações em condutos fechados de água bruta e tratada, junto a instalações de captação, transporte e distribuição de água, a técnica fundamental e auditável da pitometria tem se mostrado uma ferramenta bastante apropriada para a validação de medidas de vazão de água em tubulações de grande diâmetro. De fato, a técnica de pitometria permite a calibração¹ dos macromedidores de vazão dentro da periodicidade e da incerteza de medida definidas pelo usuário ou estabelecida em contratos ou regulamentos metrológicos, sem a necessidade de remover o medidor de vazão do seu local de operação em campo e enviá-lo a um laboratório de vazão.

Além disso, na recalibração de macromedidores de vazão pela técnica de pitometria, não é necessário que o operador conheça e domine a tecnologia de aquisição e processamento de sinais utilizada pelo fabricante de seu medidor, pois o resultado final

1 Alguns profissionais questionam o uso do termo calibração na aplicação da técnica de pitometria, mas a expressão é correta do ponto de vista metrológico, desde que sejam informados o resultado e a incerteza de medida associada, cabendo ao interessado julgar se a mesma é adequada para o caso.

do sistema de medição como um todo é validado, garantindo assim a confiabilidade dos resultados da medição de vazão.

Da mesma forma, com a pitometria em campo, podem ser resolvidas as questões referentes aos efeitos da instalação do medidor, das condições do escoamento de água no conduto e da amostragem da velocidade do escoamento somente em um ponto específico da seção transversal do conduto ou apenas em uma ou duas trajetórias através do escoamento, uma vez que o sistema de medição e a instalação associada são avaliados de forma conjunta, o que dificilmente poderia ser realizado em laboratório, mesmo nos mais bem equipados.

Por fim, embora as incertezas de medida associadas aos resultados das medições realizadas com a aplicação da técnica de pitometria sejam maiores quando comparadas às obtidas nas calibrações de medidores de vazão de água em uma bancada de testes de laboratório, a rastreabilidade metrológica dos resultados da medição pode ser garantida durante os muitos anos de operação de um medidor instalado no campo.

Nesse sentido, o presente manual orientativo tem como objetivo apresentar de forma simples e objetiva a metodologia de medição de vazão de água por pitometria, mostrando os fundamentos teóricos envolvidos, os procedimentos práticos e os cuidados necessários à aplicação da técnica, o método de mapeamento do perfil de velocidades do escoamento, além da instrumentação e dos *softwares* utilizados.

2-MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO DE MACROMEDIDORES DE VAZÃO

O VIM - *Vocabulário Internacional de Metrologia* [2] define o termo calibração de um instrumento de medição como uma operação que estabelece, sob condições especificadas, numa primeira etapa, uma relação entre os valores e as incertezas de medida fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas de medida associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção de um resultado de medição a partir de uma indicação.

2.1 Calibração de medidores de vazão em laboratório

Teoricamente, a calibração de um instrumento de medição deveria ser realizada em laboratório (**Figura 5**) sob condições controladas e de preferência em laboratório acreditado por organismo de acreditação signatário do acordo multilateral com a ILAC (<https://ilac.org/>) ou o IAF (<https://www.iaf.nu/>), no caso do Brasil a Cgcre – Coordenação Geral de Acreditação do Inmetro.



Fonte: www.gflowplus.com/

Figura 5. Calibração de macromedidor de água em laboratório de vazão.

Entretanto, um dos problemas decorrentes da calibração de um medidor de vazão em laboratório é o levantamento do seu parâmetro de desempenho metrológico sob condições controladas e idealizadas, muitas vezes totalmente diferentes das condições reais de operação do medidor no campo, fato que pode induzir a erros de aplicação (uso de correlações e valores de parâmetros de desempenho metrológico válidos nas condições de laboratório, mas não necessariamente nas situações de campo) e, conseqüentemente, à subestimativa das incertezas associadas às medidas de vazão.

Por implicar dificuldades operacionais, como os decorrentes da parada da produção e/ou da distribuição de água, além dos custos logísticos elevados para desmontagem e transporte de um macromedidor do campo até um laboratório, existe

na área de saneamento a prática de não se retirar da linha os medidores de vazão de grandes dimensões para serem calibrados em laboratório.

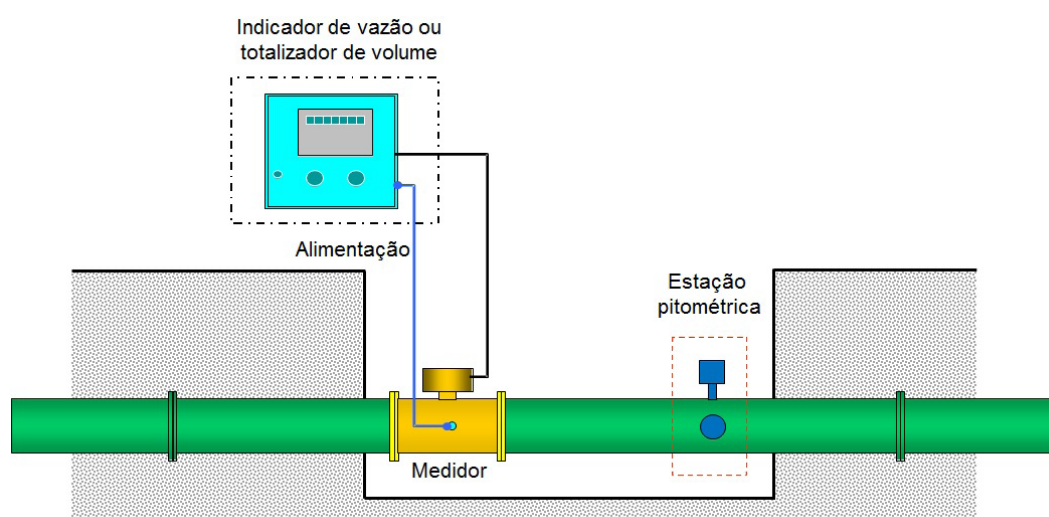
2.2 Calibração de macromedidores de vazão por pitometria

Apesar das dificuldades e dos problemas relacionados à calibração de macromedidores de vazão de água em laboratório, é fato que todo medidor de vazão ou, preferencialmente, o sistema de medição de vazão como um todo, necessita ser submetido a uma avaliação técnica de tempos em tempos para confirmar se o seu desempenho metrológico continua adequado à aplicação proposta. Essa avaliação pode ser desde uma calibração completa do medidor ao longo de todo o seu intervalo de operação, ou mesmo uma simples checagem da sua indicação em uma única vazão.

Como possíveis alternativas para a solução desse problema podem ser mencionadas a calibração do macromedidor por comparação direta da sua indicação de vazão contra a vazão medida por meio de um medidor padrão eventualmente existente em outro ponto da mesma linha ou a comparação do volume totalizado pelo macromedidor com o volume de água armazenado em um reservatório durante um determinado período de tempo.

Não obstante, dentre as formas alternativas de calibração dos macromedidores de vazão em campo, a mais difundida e utilizada pelas empresas de saneamento do Brasil é o método do mapeamento pitométrico do perfil de velocidades do escoamento.

Esse método normalmente se aplica à calibração de macromedidores de vazão de água com diâmetros maiores do que 200 mm, normalizados ou não. Tais medidores devem estar montados em tubulações onde há condições para a instalação de uma estação pitométrica em série ao medidor em calibração para permitir a introdução de um tubo de Pitot do tipo Cole no escoamento, como ilustrado na **Figura 66**.



Fonte: IPT

Figura 6. Exemplo de instalação em série de macromedidor de vazão de água e estação pitométrica para calibração.

A metodologia de calibração em campo de um macromedidor de vazão de água pelo método do mapeamento pitométrico do perfil de velocidades do escoamento é comprovadamente uma solução eficaz para se avaliar o desempenho metrológico de um macromedidor.

Além de proporcionar normalmente uma redução de custos em relação à calibração de um macromedidor em laboratório, uma calibração por pitometria em campo permite, muitas vezes, a análise e a quantificação dos efeitos da instalação e das condições operacionais do sistema hidráulico sobre o desempenho do medidor, o que uma calibração realizada em laboratório não pode propiciar, pois é realizada em condições idealizadas de instalação e operação.

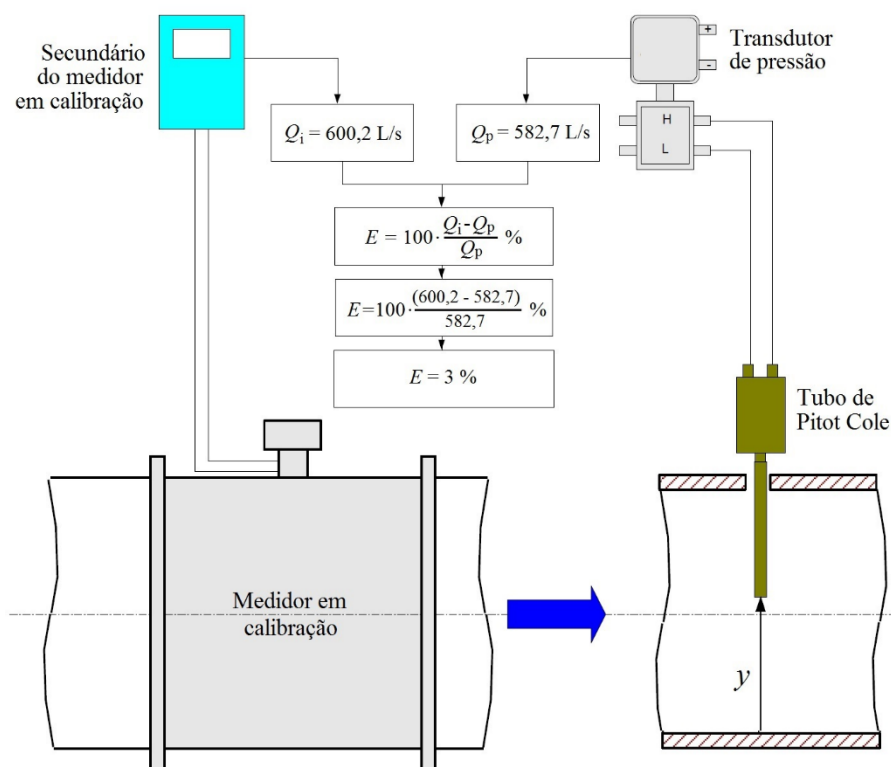
Uma vantagem adicional do método de pitometria é a possibilidade de proporcionar uma rastreabilidade metrológica das medidas realizadas com o macromedidor de vazão calibrado aos padrões do SI-*Sistema Internacional de Unidades*, uma vez que todos os instrumentos de medição utilizados podem ser facilmente calibrados em laboratórios acreditados e o princípio de medição é de conhecimento público e cientificamente validado.

No entanto, devido às limitações impostas pelas instalações e condições operacionais do processo em campo, as incertezas associadas aos resultados da calibração de um macromedidor *in situ* tendem a ser normalmente superiores às incertezas de medida resultantes de uma calibração desse mesmo medidor realizada em laboratório.

Esse aumento do valor da incerteza de medida deverá ser avaliado pelo usuário do medidor para decidir se esse parâmetro de confiabilidade metrológica obtido é aceitável para a aplicação específica. De fato, uma incerteza de medida da ordem de 2% a 3 % do valor medido pode ser aceitável quando o parâmetro for utilizado para fins de controle operacional de um sistema hidráulico industrial ou de irrigação. Por outro lado, pode eventualmente não ser suficiente para atender a um requisito de contrato ou de regulamento metrológico para uma medição fiscal, de transferência de custódia ou comercial de venda da água a terceiros.

2.3 Calibração de um macromedidor de vazão de água em campo

Em essência, a calibração de um instrumento de medição se baseia na comparação dos valores indicados pelo medidor com os valores fornecidos por um medidor padrão. No caso do mapeamento pitométrico do perfil de velocidades do escoamento em campo, o medidor padrão é fundamentalmente o sistema de medição de vazão composto pelo tubo de Pitot do tipo Cole, os transdutores de pressão diferencial, o conversor analógico/digital (A/D) e o algoritmo de cálculo da vazão, conforme o esquema apresentado na **Figura 7**.



Fonte: IPT

Figura 7. Esquema da calibração de um medidor de vazão de água por meio do método de mapeamento pitométrico do perfil de velocidades do escoamento.

Nesse caso, o objetivo da calibração é determinar o erro de medida da vazão de água apresentado pelo medidor em calibração. O erro de medida (E), expresso normalmente na forma porcentual, é calculado pela diferença entre a vazão indicada pelo medidor em calibração (Q_i) e a vazão de referência medida pelo sistema de medição por pitometria (Q_p), dividida pela vazão de referência. Ou seja:

$$E = 100 \cdot \frac{(Q_i - Q_p)}{Q_p} \quad (1)$$

Para entender melhor o fundamento da técnica, é apresentado, a seguir, um breve histórico da origem do tubo de Pitot e do desenvolvimento da pitometria.

3-A TÉCNICA DE PITOMETRIA

Por volta do ano 1732, o engenheiro francês Henri Pitot (1695–1771), especialista em Hidráulica, enunciou o princípio de funcionamento de uma sonda para a medição de velocidades de escoamentos de água que até hoje é conhecido pelo seu nome: o tubo de Pitot [3]. A **Figura 8** mostra um retrato de Henri Pitot e ilustrações dos desenhos originais do tubo e seus acessórios.



Fonte: <https://www.greatlakesskipper.com/blog/post/merci-mon-sieur-pitot>

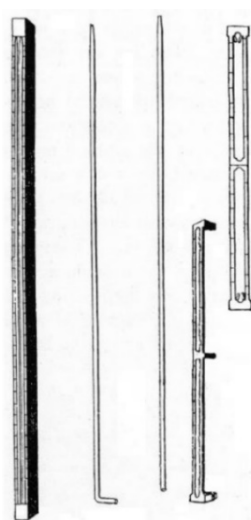
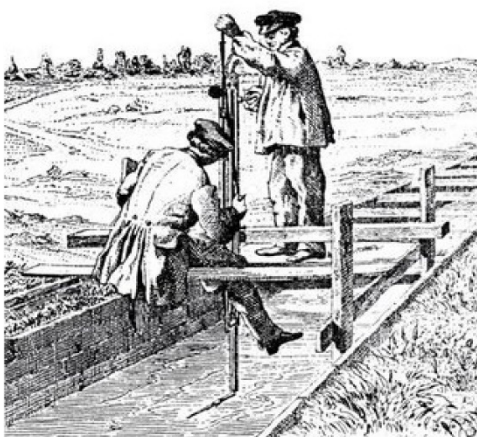


Figura 8. Henri Pitot e ilustrações de seu tubo e acessórios.

A ideia desenvolvida por Pitot de que a velocidade do escoamento da água era proporcional à raiz quadrada da pressão medida por meio de um manômetro de coluna de líquido foi utilizada aproximadamente 125 anos depois por outro engenheiro francês chamado Henry Darcy (1803–1858) [4], para a medição da velocidade do escoamento de água em um canal aberto conforme ilustração apresentada na **Figura 9**.



Fonte: <http://www.americanartifacts.com/smma/pit/pit.htm>

Figura 9. Ilustração do experimento de Henry Darcy para a medição da velocidade do escoamento de água em canal aberto utilizando um tubo de Pitot.

Em 1896, Edward Smith Cole, um engenheiro aeronáutico americano, desenvolveu e propôs um tubo de Pitot modificado para trabalhar em condutos pressurizados [5]. Conforme ilustração apresentada na **Figura 10**, a sonda era reversível com dois *tips* de medição de pressão alinhados ao eixo da tubulação, porém em sentidos opostos.



Fonte: Edward Cole, 1935

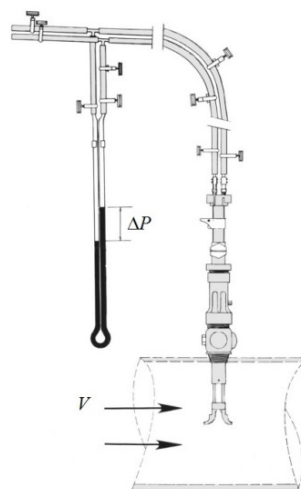
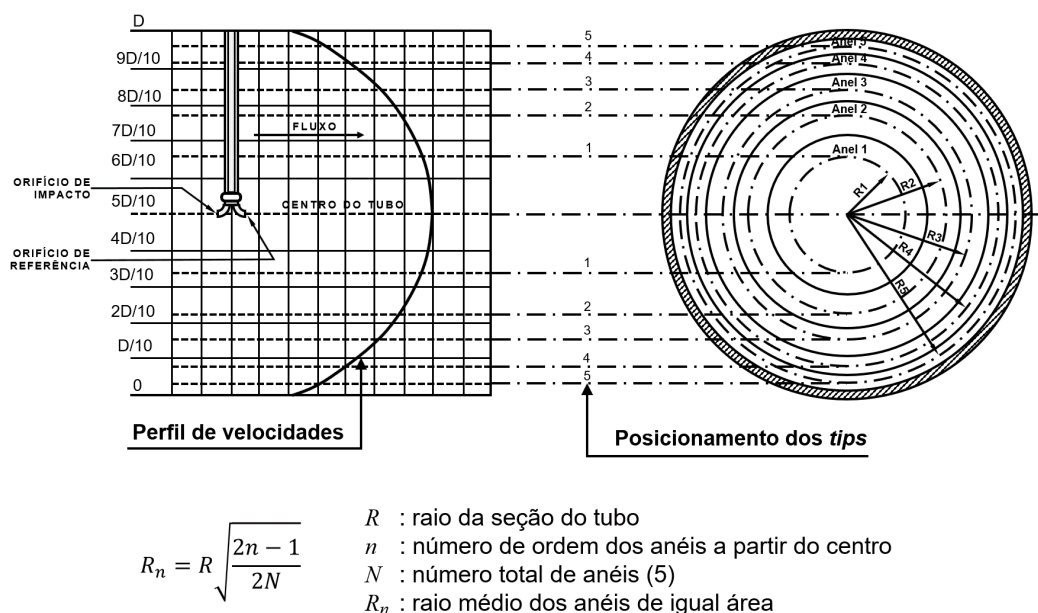


Figura 10. Edward Smith Cole e seu tubo de Pitot modificado.

Mais tarde, em 1935, Edward Cole publicou um artigo técnico no qual descreveu uma metodologia para o levantamento do perfil de velocidades do escoamento no interior de uma tubulação baseado na técnica dos anéis de áreas iguais e um método para a integração dessas velocidades, conforme ilustrado na **Figura 11**.

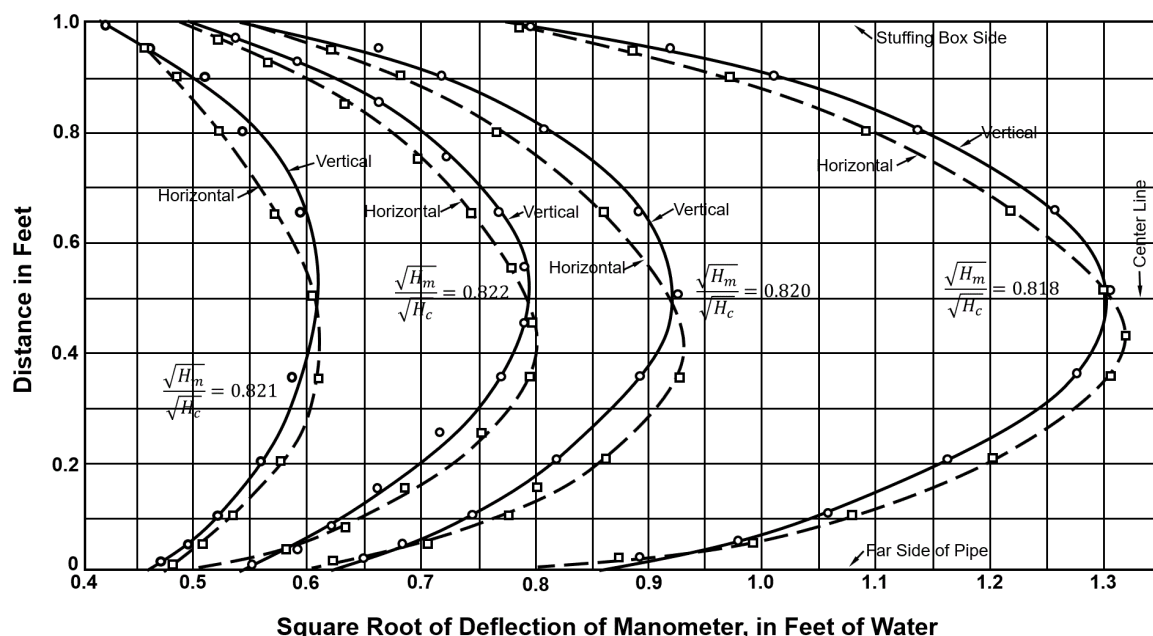


Fonte: IPT.

Figura 11. Mapeamento do perfil de velocidades do escoamento em conduto forçado proposto por Edward Cole.

Edward Cole também enfatizou em seu trabalho a necessidade de calibração do tubo de Pitot desenvolvido por ele. Inclusive realizou experimentos de calibração

em uma tubulação de 12 polegadas de diâmetro (**Figura 12**) por comparação com um tubo de Venturi de 16 polegadas. Os resultados mostraram que existia uma correção que deveria ser aplicada à equação desenvolvida por Henri Pitot, cujo valor, segundo ele, poderia variar de 0,84 a 0,89.



Fonte: adaptado de Edward Cole, 1935

Figura 12. Perfis de velocidades produzidos por Cole em uma tubulação de 12 polegadas de diâmetro para varreduras na vertical e na horizontal

Quase um século se passou desde os primeiros desenvolvimentos realizados por Edward Cole em suas sondas de velocidade, e atualmente eles ainda são amplamente utilizados nas empresas de saneamento mantendo, até então, as formas geométricas e dimensionais e, basicamente, a mesma metodologia de cálculo.

Não obstante, há que se considerar que a evolução da instrumentação de medição de pressão diferencial e dos sistemas de aquisição e transmissão de dados e da informática tem proporcionado condições para um desempenho metrológico cada vez mais refinado da técnica de pitometria sem deixar de ser prático o suficiente para a realização de medições de vazão e calibrações de macromedidores de vazão em campo, permitindo uma redução significativa das incertezas de medida associadas aos resultados.

3.1 O desenvolvimento da pitometria no Brasil

No Brasil, um dos principais desenvolvimentos na aplicação da técnica de pitometria na medição de vazão de água ocorreu em 2001, quando o Instituto de Pesquisas Tecnológicas-IPT firmou um contrato com a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo-Sabesp para a realização de diagnósticos e avaliações das estações de macromedição de vazão água do extremo norte da Região Metropolitana de São

Paulo. A partir deste contrato, o IPT deu início ao desenvolvimento da metodologia apresentada neste manual com a incorporação, na época, de:

- transdutores de pressão diferencial capacitivos e sistemas de aquisição de dados (*dataloggers*);
- rastreabilidade das medidas por meio de calibração não somente dos transdutores de pressão, mas também dos tubos de Pitot;
- procedimento de medição baseado na norma técnica BS 1042-2.1:1983, ISO 3966:1977 *Measurement of fluid flow in closed conduits. Velocity area methods. Method using Pitot static tubes* [6];
- ferramenta para avaliação das incertezas de medida associadas aos resultados das medições.

Nos anos seguintes, o IPT desenvolveu um novo de sistema eletrônico para a determinação da vazão de água em estações pitométricas com uma tecnologia de aquisição de dados totalmente digital, em substituição ao sistema analógico de armazenamento de dados via *dataloggers*. Essa inovação resultou em importantes melhorias no sistema e, conseqüentemente, elevação do nível de confiabilidade das medidas. Esse novo sistema incorporava:

- um processo de amostragem simultânea de diversas variáveis, entre as quais os sinais de pressão diferencial no tubo de Pitot e da vazão indicada pelo macromedidor em calibração;
- a visualização dos dados e dos resultados *on-line*, possibilitando ajustes ou ações corretivas imediatas pelo operador;
- uma melhor confiabilidade metrológica devido à não existência de conversão de sinais analógicos em digitais, podendo ser utilizada toda a faixa de operação dos transmissores de pressão diferencial;
- a possibilidade de realização de medições em condutos com variações de até 10 % na vazão;
- a possibilidade de ampliação da faixa de medição com tubo de Pitot em baixas velocidades, de até 0,3 m/s (anteriormente, o limite inferior era de 0,6 m/s);
- um processo sistematizado de análise das fontes de incerteza de medida baseado nas diretrizes do guia ISO GUM [7], adotado pelo Inmetro e reconhecido internacionalmente como referência na maioria das áreas metrológicas;
- uma incerteza de medida da ordem de 2 % da vazão medida, dependendo das condições de instalação da estação pitométrica; valores comprovados por meio de ensaios nos laboratórios de vazão do IPT e diversos ensaios em estações pitométricas de campo.

Esse sistema desenvolvido pelo IPT demonstrou que a incerteza de medida da ordem de 2 % da vazão medida preconizada por algumas publicações técnicas sobre pitometria somente pode ser alcançada por meio de uma análise criteriosa das condições de medição existentes no local e de um rigoroso controle metrológico dos parâmetros de processo envolvidos, controle este muitas vezes negligenciado pelas equipes de pi-

tometria. Quando tais requisitos não são atendidos, as incertezas de medida associadas aos resultados de uma pitometria podem ser muito maiores, ultrapassando facilmente os 5 % ou 10 % da vazão medida.

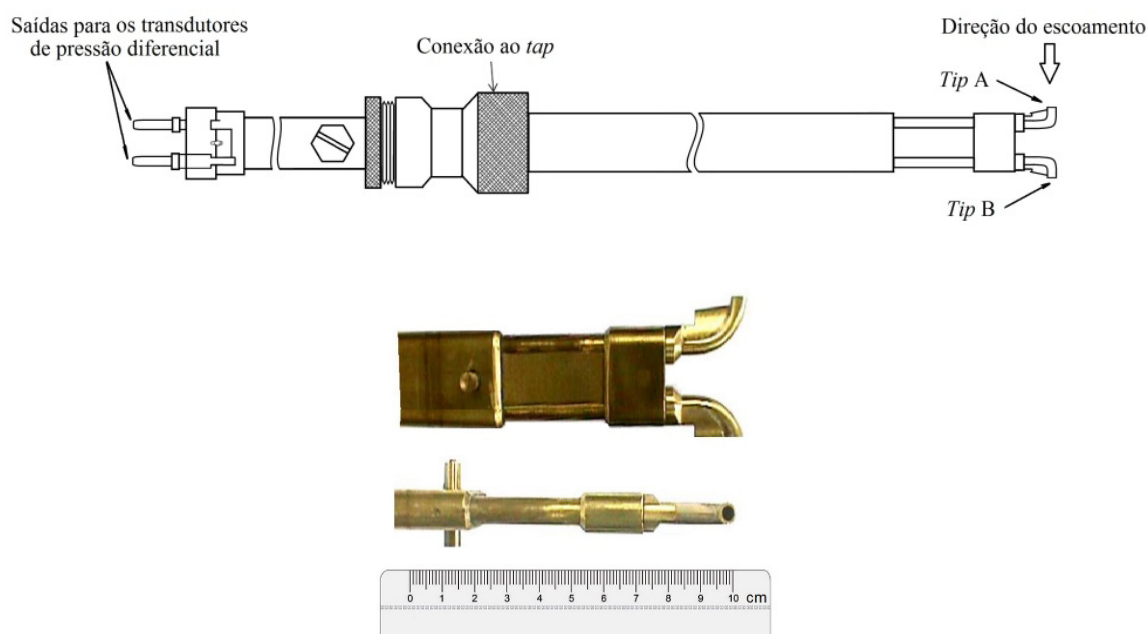
O presente manual apresenta a metodologia desenvolvida pelo IPT para a calibração em campo de macromedidores de vazão de água de diferentes tecnologias utilizando o método do mapeamento pitométrico do perfil de velocidades do escoamento na tubulação.

Como curiosidade, vale mencionar uma frase de Edward Cole no final do seu artigo técnico de 1935, a respeito do que viria a ser chamado de tubo de Pitot do tipo Cole: “... *In the hands of trained and experienced men this device is a useful and accurate instrument*”.

3.2 O tubo de Pitot do tipo Cole atual

Atualmente, o tubo de Pitot do tipo Cole comercial é uma sonda de pressão diferencial baseada em desenho proposto por Edward Cole por volta de 1896. A sonda é composta por dois tubos paralelos de aproximadamente 6 mm de diâmetro externo (*tips*), dobrados em curvas de 90° e alinhados em posição oposta nas extremidades. Dessa forma, uma das tomadas de pressão estará orientada frontalmente ao escoamento do líquido e a outra na posição contrária. A tomada de pressão frontal ao escoamento (*tip A*) tem como função medir a pressão total do escoamento de água e a outra (*tip B*) deve medir a pressão de esteira, definindo assim um sinal de pressão diferencial a ser medido pelos transdutores de pressão, sendo que este valor, de acordo com o Teorema de Bernoulli, será proporcional ao quadrado da vazão volumétrica do líquido.

Uma ilustração e detalhes do tubo de Pitot do tipo Cole comercial são mostrados na **Figura 13**.



Fonte: IPT

Figura 13. O tubo de Pitot do tipo Cole.

Na medição da vazão de água em tubulações de grandes dimensões, é comum o uso de um tubo de Pitot do tipo Cole especial, que possui um pino de segurança localizado entre os *tips* para protegê-los de possíveis danos causados por seu eventual impacto contra as paredes internas do tubo durante a inserção da sonda. A **Figura 14** apresenta uma fotografia desse tipo especial de tubo de Pitot do tipo Cole com um pino de segurança entre os *tips*.



Fonte: IPT

Figura 14. Tubo de Pitot do tipo Cole especial com um pino de segurança entre os *tips*.

3.3 Calibração do tubo de Pitot do tipo Cole

Devido às características dimensionais e construtivas especiais que dificultam a fabricação de sondas exatamente idênticas, os tubos Pitot do tipo Cole necessitam ser calibrados individualmente em um laboratório de vazão de fluidos. Isso pode ser feito utilizando-se um túnel de vento aerodinâmico, como mostrado na **Figura 15**.



Fonte: IPT

Figura 15. Calibração de tubo de Pitot do tipo Cole em túnel de vento aerodinâmico.

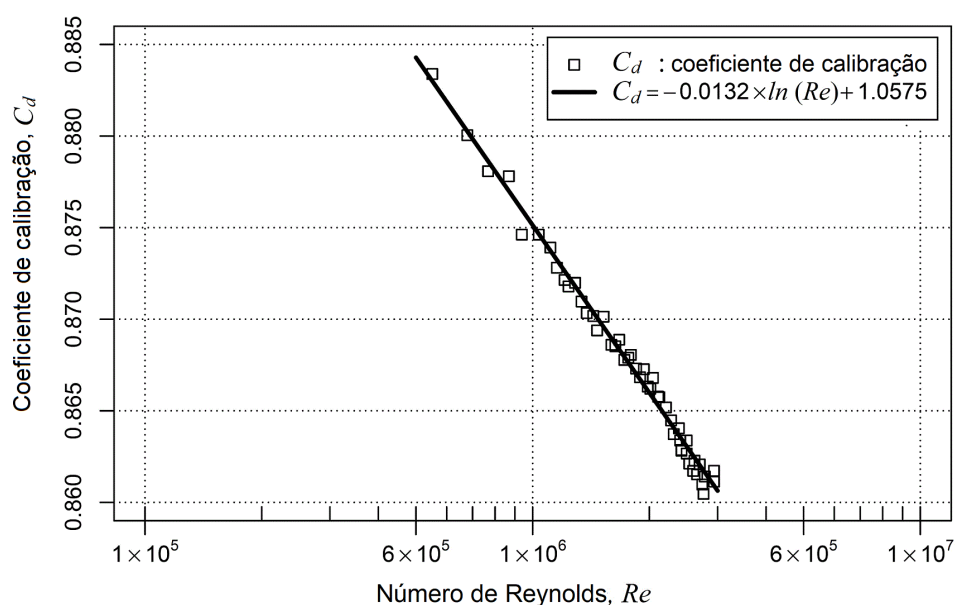
Testes realizados no IPT utilizando um túnel de vento e um tanque de provas de reboque (*towing tank*) longo mostraram que os tubos de Pitot do tipo Cole podem

ser calibrados com escoamentos de ar e utilizados em escoamentos de água, desde que a similaridade do número de Reynolds seja respeitada [8].

Durante a calibração, o tubo de Pitot do tipo Cole é posicionado na área central da seção de descarga do túnel de vento, evitando-se as regiões próximas às suas paredes internas. Neste método, um tubo de Pitot estático convencional do tipo L é utilizado como sonda de velocidade do ar de referência. Por sua vez, esse tubo de Pitot estático convencional é previamente calibrado por meio de um anemômetro do tipo laser Doppler (*Laser Doppler Anemometer* - LDA). Ambos os tubos de Pitot são conectados a transdutores de pressão diferencial e são comparadas duas sequências crescentes de pontos de calibração que consistem em dez velocidades de escoamento de ar entre 5 m/s e 36 m/s.

Com base na Lei de Similaridade dos números de Reynolds (Re), em que esses adimensionais no escoamento de água ($Re_{\text{água}}$) e no escoamento de ar (Re_{ar}) são iguais, esses limites de velocidade do escoamento de ar (5 m/s e 36 m/s) correspondem a velocidades de escoamento de água de 0,3 m/s e 2,4 m/s, respectivamente.

O valor médio do coeficiente de calibração recomendado pela literatura para tubos de Pitot convencionais do tipo Cole, incluindo correções, é 0,8696 [9], podendo, porém, variar em função do número de Reynolds do escoamento. A **Figura 16** apresenta um gráfico de coeficiente de calibração de tubos de Pitot do tipo Cole comumente utilizado por empresas de serviços públicos de água no Brasil.



Fonte: SABESP [9].

Figura 16. Dependência do coeficiente de calibração (C_d) dos tubos de Pitot do tipo Cole em relação ao número de Reynolds.

O número de Reynolds do escoamento é definido como:

$$Re = \frac{V L}{\nu} \quad (2)$$

onde V é a velocidade do escoamento de fluido em m/s, L é um comprimento característico, aqui fixado em 1 m, e $\nu = 1,004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ($= 1,004 \text{ cSt}$) é a viscosidade cinemática da água a 20 ° C.

Os resultados mostrados na **Figura 16** para a faixa de $5 \times 10^5 < Re < 3 \times 10^6$ correspondem a uma faixa de velocidades do escoamento de água de $0,5 \text{ m/s} < V < 3,0 \text{ m/s}$. Nesta faixa de velocidades, o coeficiente de calibração do tubo de Pitot do tipo Cole varia entre 0,883 a 0,5 m/s e 0,861 a 3,0 m/s, com um valor médio de aproximadamente 0,867.

O coeficiente de calibração do tubo de Pitot do tipo Cole (C_d) é obtido utilizando-se a expressão:

$$C_d = C_s \sqrt{\left(\frac{\Delta P_s}{\Delta P_c}\right)} \quad (3)$$

onde $C_s = 0,997$ é o coeficiente de calibração do tubo de Pitot estático do tipo L utilizado como sonda padrão [10], ΔP_s e ΔP_c são, respectivamente, as pressões diferenciais obtidas pelo tubo de Pitot estático do tipo L e pelo tubo de Pitot do tipo Cole.

3.4 Levantamento do perfil de velocidades do escoamento

Para a determinação da vazão de água por meio da técnica de pitometria, segue-se a orientação da norma técnica ABNT NBR ISO 3966 *Medição de vazão em condutos fechados – Método velocimétrico utilizando tubos de Pitot estático* [11] para o cálculo da velocidade média do escoamento na seção transversal do tubo utilizando o tubo de Pitot do tipo Cole e a distribuição *log-linear* para o mapeamento das velocidades do escoamento em onze pontos distribuídos ao longo do diâmetro de medição do conduto, conforme indicado na Tabela 3 da referida norma. Para condutos de diâmetros menores, a norma indica a alternativa do mapeamento em sete pontos.

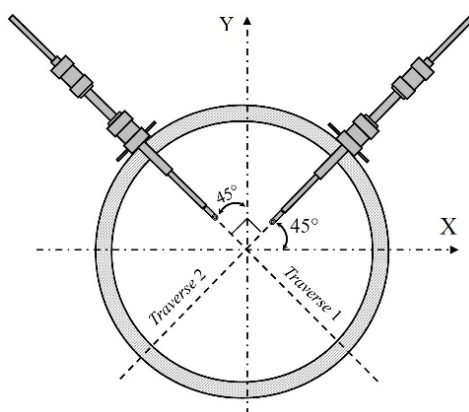
A adoção das recomendações da norma ABNT NBR ISO 3966, com respeito às posições de medição no interior da tubulação, é uma das principais mudanças em relação à metodologia desenvolvida por Edward Cole e adotada pela maioria das empresas de saneamento no Brasil. A metodologia de Cole estabelece o mapeamento em dez posições igualmente distribuídas e distantes entre si numa razão diâmetro/10, enquanto a norma ABNT NBR ISO 3966 estabelece uma distribuição não uniforme dos pontos de medição e concentrada na região mais próxima à parede do tubo, podendo ser de sete ou onze posições ao longo do diâmetro, conforme mencionado. Esta forma de distribuição dos pontos de medição, conhecida por *log-linear*, visa caracterizar melhor o perfil de velocidades na região próxima à parede, justamente onde ocorrem os maiores gradientes de velocidades do escoamento. A simples adoção deste procedimento altera o valor da vazão de 0,5 % a 0,8 %, dependendo da faixa de número de Reynolds do escoamento específico.

Outra mudança importante na metodologia é o mapeamento do perfil de velocidades do escoamento em dois diâmetros perpendiculares entre si para melhor caracterizar e quantificar a vazão quando o perfil de velocidades não é uniforme e axis-

simétrico, muito comum em tubulações que apresentam conexões (como curvas, tês, *headers*, reduções etc.), válvulas, filtros e bombas próximos ao local da medição.

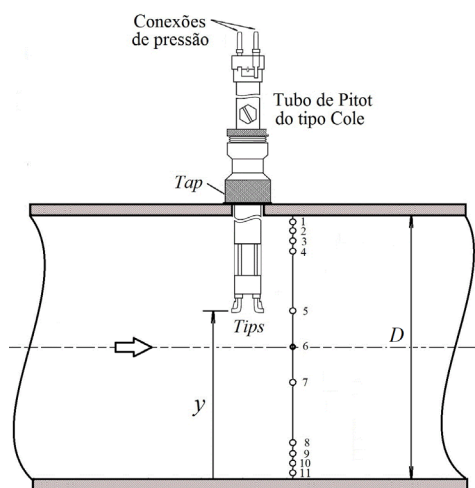
A garantia da existência de um perfil de velocidades uniforme e axissimétrico pode permitir o levantamento do perfil de velocidade em apenas um diâmetro, situação normalmente observada em instalações com longos trechos retos de tubulação à montante e à jusante dos *taps* de pitometria.

Na **Figura 17** e na **Figura 18**, respectivamente, são mostrados os *taps* de pitometria no perímetro externo do tubo e as onze posições de medição ao longo do diâmetro de varredura, também conhecido como *traverse*, em relação à dimensão de referência y , cuja numeração crescente se inicia no ponto próximo ao *tap* e termina no ponto próximo à parede oposta ao mesmo.



Fonte: IPT

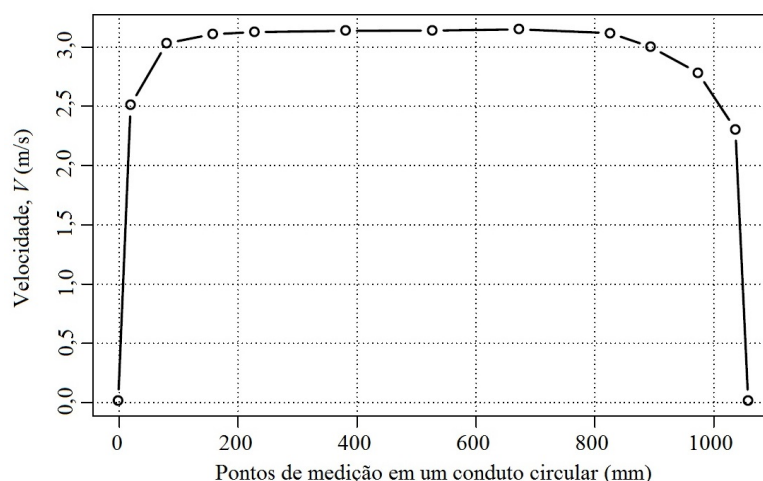
Figura 17. Posição dos *taps* para mapear o perfil de velocidades do escoamento ao longo de dois diâmetros dispostos perpendicularmente entre si.



Fonte: IPT

Figura 18. Posições dos pontos de medição de velocidades ao longo do *traverse*.

A título de ilustração, a **Figura 19** mostra um exemplo de perfil de velocidades do escoamento de água, incluindo os onze pontos de medição das velocidades do escoamento, situação onde se pode considerar a existência de um perfil de velocidades uniforme e levemente assimétrico.



Fonte: IPT

Figura 19. Exemplo de perfil de velocidades do escoamento de água determinado por meio do mapeamento das velocidades em onze pontos ao longo do diâmetro de varredura do conduto.

3.5 Cálculo de vazão de água

A vazão de água (Q) no conduto é calculada em função da velocidade média do escoamento (\bar{V}) na seção de medição e da área de seção transversal interna (S) do local de medição. Isto é:

$$Q = \bar{V} \cdot S \quad (4)$$

e:

$$\bar{V} = C_d \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_i}{\rho_o}}}{n} \quad (5)$$

onde:

C_d : coeficiente de calibração do tubo de Pitot do tipo Cole;

ΔP_i : pressão diferencial medida em cada ponto do mapeamento de velocidades;

ρ_o : massa específica da água nas condições da medição, $\rho_{o, 25^\circ\text{C}} = 997,043 \text{ kg/m}^3$.

n : número de pontos de medição ao longo do diâmetro

A vazão de água também pode ser calculada a partir da velocidade do escoamento medida no ponto central da seção de medição (V_c), do fator de velocidade média (FV) e da área de seção transversal interna do local de medição (S). Isto é:

$$Q = FV \cdot V_c \cdot S \quad (6)$$

onde:

$$FV = \frac{\sum_i^n \sqrt{\Delta P_i}}{\sqrt{\Delta P_c}}$$

: é o fator de velocidade média, particular do escoamento e válido exclusivamente para o conduto específico, com as singularidades próximas a montante e a jusante da estação pitométrica e faixa de número de Reynolds característico. Essa é uma correção empírica para o cálculo da integral da lei de von Kármán (lei da potência);

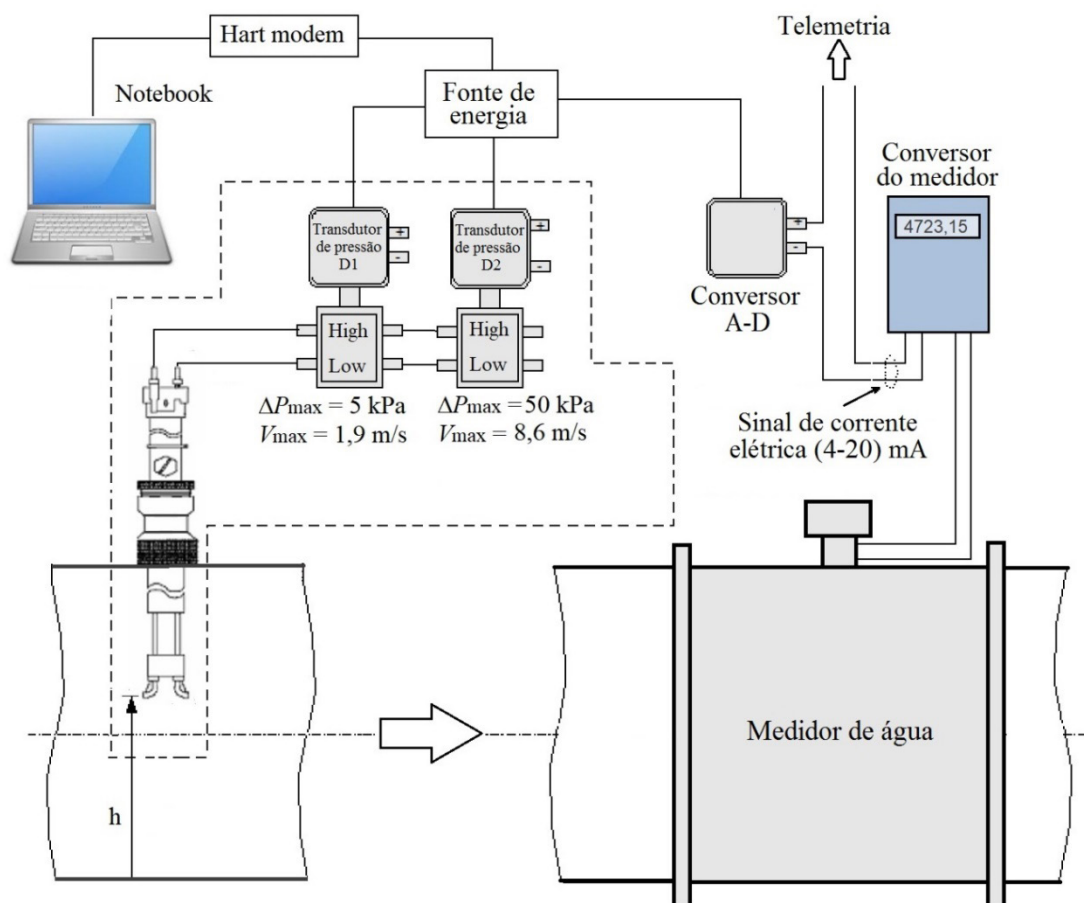
ΔP_c : é a pressão diferencial medida com o tubo de Pitot do tipo Cole instalado no ponto central da seção, referente ao eixo do tubo.

Não estão considerados na equação (6) os fatores de correção descritos por alguns manuais de pitometria, tais como: correção da massa específica do fluido manométrico, eventual projeção do *tap* no interior da tubulação e possível correção do diâmetro devido à incrustação na parede do tubo. A metodologia proposta pelo IPT considera o uso de transmissores de pressão eletrônicos e não manômetros do tipo coluna de líquido, já a eventual projeção do *tap* no interior da tubulação é tratada conjuntamente ao fator de redução de área decorrente da projeção do perfil do tubo de Pitot Cole no interior do escoamento. Os efeitos decorrentes de eventual incrustação na parede do tubo devem ser avaliados caso a caso, sendo que nas situações mais graves, deve-se buscar realizar a pitometria em outra seção menos afetada da tubulação ou mesmo proceder à limpeza do tubo previamente à realização das medições.

3.6 Esquema da instrumentação

A metodologia desenvolvida e aplicada pelo IPT permite o monitoramento do sinal de um medidor de vazão presente em série na mesma tubulação durante o processo de mapeamento do perfil de velocidades do escoamento. Isso possibilita a execução simultânea da calibração do medidor de vazão e que se façam correções de possíveis flutuações do escoamento que possam ocorrer durante as medições. Este monitoramento do sinal do medidor é outro aprimoramento da metodologia de medição, pois durante uma calibração de um macromedidor em campo não é possível garantir que a vazão permaneça estável durante o levantamento do perfil de velocidades do escoamento, uma vez que todo o procedimento pode durar mais de uma hora para ser concluído. Nessas situações, o não monitoramento e correções da vazão invariavelmente impactariam os resultados da calibração do macromedidor.

A **Figura 20** apresenta o esquema da instrumentação utilizada para o mapeamento dos perfis de velocidades do escoamento estabelecido na seção de medição do tubo.



Fonte: IPT

Figura 20. Esquema da instrumentação utilizada para o mapeamento do perfil de velocidades do escoamento por meio da técnica de pitometria.

4-PLANEJAMENTO DA CALIBRAÇÃO

Esta parte do Manual apresenta uma série de atividades importantes que devem ser realizadas para o bom desempenho da medição de vazão por pitometria e que precedem à calibração propriamente dita do macromedidor de água em campo. São ações e protocolos que devem ser observados pelo operador a fim de planejar adequadamente e executar de forma apropriada a pitometria, minimizando os riscos de falhas e insucessos na campanha de medição desenvolvida em campo.

4.1 Checklist para avaliação das instalações e configurações do medidor a ser calibrado e da estação de pitometria

Para que a avaliação do desempenho metrológico do sistema de macromedição ou mesmo a sua calibração utilizando a técnica de pitometria seja feita de forma correta e eficaz, é importante que seja realizada previamente uma inspeção técnica do local e dos equipamentos instalados na estação com o auxílio de um *checklist* padronizado.

Este item apresenta o modelo de *checklist* e uma descrição detalhada dos seus campos.

CABEÇALHO

Data: data da inspeção e preenchimento do *checklist*.

I – ELEMENTO PRIMÁRIO: é o elemento sensor do medidor instalado na tubulação.

Tag: código utilizado para identificar o medidor no cadastro de macromedidores do cliente.

Denominação: nome usual dado ao medidor no cadastro de macromedidores do cliente.

Tipo do medidor: eletromagnético, ultrassônico, tipo *clamp-on*, de corpo total ou de inserção, tubo de Venturi etc.

Marca: marca do medidor (não necessariamente é o fabricante do medidor).

Modelo: modelo oficial de catálogo do medidor.

Número de série: número de série gravado na placa de identificação do elemento primário.

Diâmetro nominal: diâmetro nominal do medidor ou da linha onde este está instalado.

Instalação do primário: exposto, enterrado ao nível do chão, em caixa de concreto com poço de visita etc. Indicar no campo de observações da página 2/2 do *Checklist* qualquer anormalidade observada no local, como inundação, restos de obra, entrada do poço de visita asfaltado etc. Sempre que possível, tirar fotos do local. As medidas corretivas necessárias para execução da pitometria devem ser tomadas antes da realização das medições.

Singularidade a montante e distância (m): singularidade mais próxima a montante do elemento primário e sua distância. A singularidade pode ser uma conexão (como curva, cotovelo, tê, redução etc.), um filtro, uma caixa, uma válvula, uma bomba etc. Caso esta

singularidade esteja separada do medidor por um trecho reto de tubulação de comprimento muito grande (dezenas de metros ou maior), estimar e assinalar a distância do trecho reto existente. Observar especialmente se existem bombas axiais ou duas ou mais curvas sequenciais em planos perpendiculares a montante do medidor. Tais elementos são capazes de induzir efeitos helicoidais no escoamento, exigindo comprimentos de trechos retos de tubulação mais longos para o condicionamento do perfil de velocidades do escoamento na seção de medição.

Singularidade a jusante e distância (m): singularidade mais próxima a jusante do elemento primário e sua distância. A singularidade pode ser uma conexão (como curva, cotovelo, tê, redução etc.), um filtro, uma caixa, uma válvula etc. Caso esta singularidade esteja separada do medidor por um trecho reto de tubulação de comprimento muito grande (dezenas de metros ou maior), estimar e assinalar a distância do trecho reto existente.

II – ELEMENTO SECUNDÁRIO: é o elemento que processa o sinal advindo do elemento primário, gerando uma indicação ou um sinal proporcional à vazão de água medida.

Marca: marca do elemento secundário.

Modelo: modelo do elemento secundário.

Número de série: número de série gravado na placa de identificação do elemento secundário.

Faixa de vazão de operação (fabricante): vazões mínima e máxima de operação recomendadas pelo fabricante. Esta informação se encontra no manual do medidor. Estas informações devem ser preenchidas antes do dia da calibração do medidor.

Faixa de vazão programada no medidor: Esta faixa vai de zero até a vazão máxima programada pelo operador, que corresponderia aos 20 mA da saída analógica do medidor. Esta informação deve ser preenchida antes do dia da calibração do medidor.

Faixa de vazão de trabalho aproximada: esta faixa de vazão pode ser obtida a partir dos registros de vazão fornecidos pelo operador. Estas informações devem ser fornecidas antes do dia da calibração do medidor. Na falta desses registros, o operador deverá estimar a faixa de trabalho que considerar mais adequada e anotá-la neste campo.

Saída analógica disponibilizada?: a saída analógica está disponibilizada e ativada para a conexão com o instrumento de medição de corrente elétrica? Caso não esteja, a saída deve ser disponibilizada e ativada antes do dia da calibração do medidor.

Instalação do secundário (descrição): exposto ao meio, somente com proteção contra a chuva e o Sol (telhado), em caixa com porta, dentro de edificação etc. Indicar no campo de observações da página 2/2 do *Checklist* alguma anormalidade como falta de chave para cadeado da porta, algum corpo pesado que impeça a abertura da porta etc. Medidas corretivas, se necessárias, devem ser tomadas antes do dia da calibração do medidor.

Pressão máxima do transdutor (span máximo) (campo a ser preenchido caso o elemento primário seja um medidor por diferencial de pressão): máxima pressão de operação recomendada pelo fabricante para o transdutor de pressão. Dado de catálogo.

Pressão máxima programada no transdutor (span) (a ser preenchido caso o elemento primário seja um medidor por diferencial de pressão): pressão máxima programada

pelo operador no transdutor; valor que corresponde aos 20 mA da saída analógica do medidor.

Fator K nominal: fator K do medidor definido como:

$$K = \frac{Q_{max}}{\sqrt{\Delta P_{max}}} \quad (7)$$

onde: Q_{max} é a vazão máxima medida pelo medidor, em m^3/s ;

ΔP_{max} é a pressão máxima programada no transdutor (*span*), em mH_2O .

III – ESTAÇÃO PITOMÉTRICA: é o conjunto de *tap*(s) e trechos retos de tubulação.

Disposição do(s) tap(s) em relação ao tubo: assinalar se a estação pitométrica possui apenas um *tap* e se este está instalado na posição vertical ou horizontal em relação ao nível do solo. Caso existam dois *taps*, indicar se eles estão instalados na vertical e na horizontal ou a 45°. A **Figura 21** ilustra as configurações típicas encontradas nas estações de pitometria em função do tipo de varredura do perfil de velocidades do escoamento.

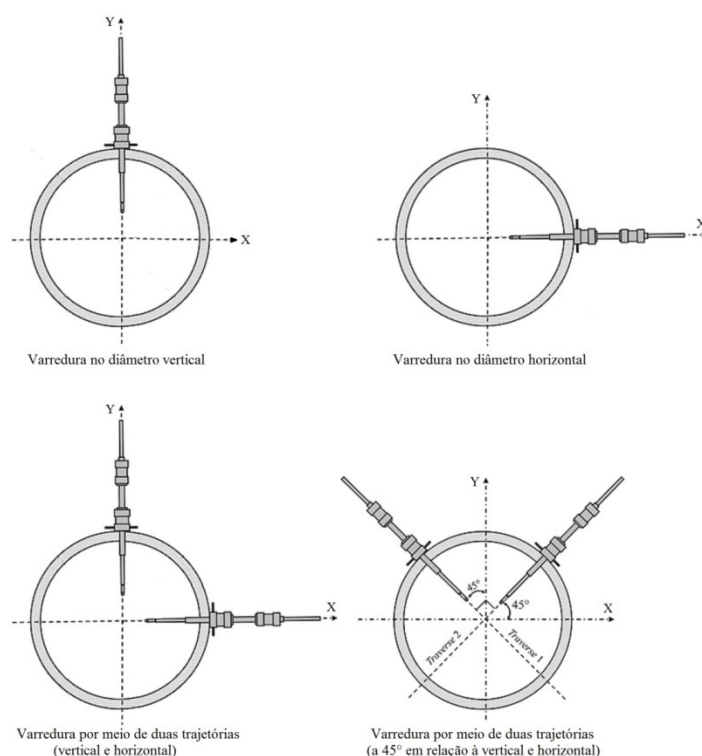


Figura 21. Posições normais de instalação de *taps* para pitometria

Diâmetro nominal do tubo: diâmetro nominal do conduto na seção transversal da estação pitométrica, em mm.

Localização do(s) tap(s) em relação ao primário do medidor e distância entre eles: assinalar se o(s) tap(s) está(ão) a montante ou a jusante do elemento primário do medidor e a distância em metros entre eles.

Derivação entre o(s) *tap(s)* e o primário: a verificação de existência ou não de derivação entre o(s) *tap(s)* e o primário tem como objetivo garantir que a vazão de água que passa pela estação pitométrica seja igual à vazão que passa pelo medidor.

Singularidade mais próxima a montante e distância em relação ao(s) *tap(s)* (m): a singularidade pode ser uma conexão (como curva, cotovelo, tê, redução etc.), um filtro, uma caixa, uma válvula, uma bomba etc. Caso esta singularidade esteja separada do medidor por um trecho reto de tubulação de comprimento muito grande (dezenas de metros ou maior), estimar e assinalar a distância do trecho reto existente.

Singularidade mais próxima à jusante e distância em relação ao(s) *tap(s)* (m): a singularidade pode ser uma conexão (como curva, cotovelo, tê, redução etc.), um filtro, uma válvula etc. Caso esta singularidade esteja separada do medidor por um trecho reto de tubulação de comprimento muito grande (dezenas de metros ou maior), estimar e assinalar a distância do trecho reto existente.

Distância do(s) *tap(s)* ao secundário do medidor (m).

Instalação da estação (descrição): exposta ao nível do chão ou enterrada em caixa de concreto com poço de visita etc. Indicar no campo **Observações** da página 2/2 do *Checklist* qualquer anormalidade observada no local como inundação, restos de obras, entrada do poço de vista asfaltado etc. No momento do preenchimento do *Checklist*, deve-se inserir um tubo de Pitot do tipo Cole no *tap* de modo a verificar a existência de alguma obstrução à sua inserção que não permita a realização da medição. Nesse caso, ações corretivas devem ser tomadas antes do dia da calibração do medidor.

Disponibilidade de fonte de energia elétrica, tensão elétrica e distância até o(s) *tap(s)*: Existe disponibilidade de energia elétrica? Qual a tensão? A corrente é contínua ou alternada? Qual a distância entre a fonte e o(s) *tap(s)*, onde ficará o *notebook* que necessita de alimentação durante a calibração. Providenciar extensão elétrica, se for o caso, antes do dia da calibração do medidor. Se não houver energia elétrica no local, providenciar um gerador elétrico portátil a gasolina.

RODAPÉ

Responsável pela avaliação: nome do responsável.

Acompanhante: se houver.

IV – OBSERVAÇÕES

Este campo destina-se ao apontamento de eventuais anormalidades observadas durante a inspeção da estação de medição. Lembrar que uma boa inspeção e um *checklist* com um maior número de detalhes contribuem para um melhor planejamento das atividades práticas a serem desenvolvidas pela equipe de pitometria.

V – ESBOÇO DA INSTALAÇÃO

Sempre que possível, devem ser elaborados desenhos esquemáticos da instalação em planta e em elevação. Estes esboços devem apresentar os elementos de tubulação, tratados nos itens anteriores: elemento primário, estação pitométrica, singularidades a montante e a jusante, assim como as respectivas distâncias entre eles.

A seguir, é apresentado o modelo sugerido de formulário de *Checklist*.

	CHECKLIST	Data: __/__/____
--	------------------	------------------

I – ELEMENTO PRIMÁRIO	
Tag	
Denominação	
Tipo do medidor	
Marca	
Modelo	
Número de série	
Diâmetro nominal (mm)	
Instalação do primário	
Singularidade a montante e distância (m)	
Singularidade à jusante e distância (m)	

II – ELEMENTO SECUNDÁRIO	
Marca	
Modelo	
Número de série	
Faixa de vazão de operação (fabricante)	
Faixa de vazão programada no medidor	
Faixa de vazão de trabalho aproximada	
Saída analógica disponibilizada?	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não
Instalação do secundário (descrição)	

Preencher abaixo caso o elemento primário seja um medidor por diferencial de pressão:

Pressão máxima do transdutor (<i>span</i> máximo)		<input type="checkbox"/> mmH ₂ O	<input type="checkbox"/> com $\sqrt{\Delta P}$
Pressão máxima programada no transdutor (<i>span</i>)		<input type="checkbox"/> mH ₂ O	<input type="checkbox"/> sem $\sqrt{\Delta P}$
Fator <i>K</i> nominal	$m^3/s \cdot (mH_2O)^{0.5}$		

III – ESTAÇÃO PITOMÉTRICA

Disposição do(s) <i>tap(s)</i> :	<input type="checkbox"/> <i>tap</i> vert.	<input type="checkbox"/> <i>taps</i> horiz.	<input type="checkbox"/> <i>taps</i> vert.+horiz.	<input type="checkbox"/> <i>taps</i> a 45°
Diâmetro nominal do tubo	mm			
Localização do(s) <i>tap(s)</i> em relação ao primário do medidor e distância entre eles	<input type="checkbox"/> montante	<input type="checkbox"/> jusante	m	
Derivação entre o(s) <i>tap(s)</i> e o primário	<input type="checkbox"/> não há	<input type="checkbox"/> capeada	<input type="checkbox"/> válv. fechada	
Singularidade mais próxima a montante e distância em relação ao(s) <i>tap(s)</i> (m)				
Singularidade mais próxima à jusante e distância ao(s) <i>tap(s)</i> (m)				
Distância do(s) <i>tap(s)</i> ao secundário do medidor (m)				
Instalação da estação (descrição)				
Disponibilidade de fonte de energia elétrica, tensão elétrica e distância até o(s) <i>tap(s)</i> :	<input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não	<input type="checkbox"/> V-CA <input type="checkbox"/> V-CC	_____ V _____ m	
Responsável pela avaliação: _____		Acompanhante: _____		

IV – OBSERVAÇÕES

--

V - ESBOÇO DA INSTALAÇÃO

Planta:

Elevação:

4.2 Avaliação da instalação do elemento primário do macromedidor de vazão

De posse do *checklist* preenchido, deve ser realizada a avaliação da instalação do elemento primário do macromedidor de vazão a ser calibrado. Esta avaliação consiste fundamentalmente na avaliação das condições de instalação do elemento primário do medidor de vazão e no levantamento dos comprimentos dos trechos retos de tubulação a montante e a jusante do mesmo.

Quanto aos valores desses comprimentos de trechos retos de tubulação, estes devem atender aos requisitos de normas nacionais e/ou internacionais. Por exemplo, para medidores do tipo eletromagnético a norma normalmente seguida é a NBR ISO 6817 *Medição de vazão de líquido condutivo em condutos fechados – Método utilizando medidores de vazão eletromagnéticos*, que estabelece a necessidade de um trecho reto mínimo de 10 diâmetros de tubulação a montante do elemento primário. Em relação ao trecho reto de jusante, a norma não define requisitos, porém é recomendável a existência de pelo menos 5 diâmetros de trecho reto.

Por sua vez, para os medidores por diferencial de pressão do tipo placa de orifício, normalmente a norma a ser atendida é a ABNT NBR ISO 5167-2 *Medição de vazão de fluidos por dispositivos de pressão diferencial inseridos em condutos forçados de seção transversal circular Parte 2: Placas de Orifício*. Nessa norma, os valores mínimos de trechos retos recomendados são fornecidos como na **Tabela 1** em função do tipo de singularidade presente a montante do medidor e da relação β , adimensional definido pela razão entre os diâmetros do orifício da placa e da tubulação.

Tabela 1. Comprimentos de trechos retos de tubulação a montante e a jusante do elemento primário de um medidor de vazão do tipo placa de orifício.

Valores expressos em múltiplos do diâmetro interno, D														Lado a jusante (saída) da placa de orifício												
Relação de diâmetros β	Lado a montante (entrada) da placa de orifício																									
	Curva única de 90° Duas curvas de 90° em qualquer plano (S > 30D) ^a		Duas curvas de 90° no mesmo plano: configuração S (30D ≥ S > 10D) ^a		Duas curvas de 90° no mesmo plano: configuração S (10D ≥ S) ^a		Duas curvas de 90° em planos perpendiculares (30D ≥ S ≥ 5D) ^a		Duas curvas de 90° em planos perpendiculares (5D > S) ^{a, b}		Tê único de 90° com ou sem uma extensão Curva mitral de 90°		Curva única de 45° Duas curvas de 45° no mesmo plano: configuração S (S ≥ 2D) ^a		Redução concêntrica 2D para D ao longo de um comprimento de 1,5D a 3D		Expansão concêntrica 0,5D para D ao longo de um comprimento de D a 2D		Válvula esfera de passagem plena ou válvula gaveta totalmente aberta		Redução simétrica abrupta		Poço ou tomada termométrica de diâmetro ^c ≤ 0,03D ^d		Conexões (colunas 2 a 11) e a tomada do densitômetro	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14												
—	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f	A ^e	B ^f
≤ 0,20	6	3	10	g	10	g	19	18	34	17	3	g	7	g	5	g	6	g	12	6	30	15	5	3	4	2
0,40	16	3	10	g	10	g	44	18	50	25	9	3	30	9	5	g	12	8	12	6	30	15	5	3	6	3
0,50	22	9	18	10	22	10	44	18	75	34	19	9	30	18	8	5	20	9	12	6	30	15	5	3	6	3
0,60	42	13	30	18	42	18	44	18	65 ^h	25	29	18	30	18	9	5	26	11	14	7	30	15	5	3	7	3,5
0,67	44	20	44	18	44	20	44	20	60	18	36	18	44	18	12	6	28	14	18	9	30	15	5	3	7	3,5
0,75	44	20	44	18	44	22	44	20	75	18	44	18	44	18	13	8	36	18	24	12	30	15	5	3	8	4
NOTA 1: Os comprimentos mínimos de trechos retos requeridos são os comprimentos entre as várias conexões localizadas a montante e a jusante da placa de orifício e a própria placa de orifício. Os comprimentos dos trechos retos devem ser medidos a partir da extremidade de jusante da porção curva da curva mais próxima (ou única) ou do tê ou da extremidade de jusante da porção curva ou cônica da redução ou da expansão.																										
NOTA 2: A maioria das curvas sobre as quais os comprimentos nesta tabela estão baseados tinham um raio de curvatura de 1,5D.																										
^a S é a separação entre as duas curvas medidas a partir da extremidade de jusante da porção curva da curva de montante até a extremidade de montante da porção curva da curva de jusante.																										
^b Esta não é uma boa instalação de montante; um condicionador deveria ser utilizado onde possível.																										
^c A instalação de tomadas ou poços termométricos não alteram os comprimentos mínimos de trechos retos de montante exigidos para as outras conexões.																										
^d Uma tomada ou poço termométrico de diâmetro entre 0,03D e 0,13D pode ser instalado desde que os valores nas Colunas A e B sejam aumentados de 20 e 10 respectivamente. Entretanto, tal tipo de instalação não é recomendada.																										
^e A Coluna A para cada conexão fornece comprimentos correspondentes aos valores para "incerteza adicional zero" (ver 6.2.3).																										
^f A Coluna B para cada conexão fornece comprimentos correspondentes aos valores para "incerteza adicional de 0,5 %" (ver 6.2.4).																										
^g O comprimento de trecho reto na Coluna A fornece incerteza adicional zero; não existem dados disponíveis para comprimentos menores de trechos retos que poderiam ser utilizados para fornecer os comprimentos de trechos retos exigidos para a Coluna B.																										
^h É exigido 95D para $R_{90} > 2 \times 10^4$ se $S < 2D$.																										

Como regra, é importante observar as recomendações de instalação presentes nos manuais técnicos dos fabricantes de medidores de vazão.

Não obstante, convém sempre considerar que, para a obtenção de vantagens comerciais, alguns fabricantes de medidores de vazão tendem a ser excessivamente otimistas em relação à definição dos comprimentos mínimos de trechos retos de tubulação requeridos por seus produtos, declarando valores inferiores aos realmente necessários.

Por fim, é fundamental entender que os valores de trechos retos de tubulação definidos nas normas técnicas e nos manuais de fabricantes são limites mínimos. Dessa forma, é recomendável que, sempre que possível, nas instalações de elementos primários de medidores de vazão sejam previstos valores maiores do que esses limites.

Além do cumprimento dos requisitos de trechos retos mínimos de tubulação a montante e a jusante do elemento primário, é importante avaliar as condições de instalação do elemento primário do medidor de vazão a ser calibrado. Nesse sentido, devem ser avaliadas as questões referentes à montagem, acesso, proteção contra adulterações, manutenção, etc. No caso de medidores de vazão com sensores do tipo inserção, é fundamental avaliar o correto posicionamento (profundidade, alinhamento, ortogonalidade em relação ao eixo do conduto) do sensor no interior do conduto.

As condições físicas da tubulação onde o elemento primário do medidor se encontra instalado também deve ser avaliado. Nesse caso, atentar ao fato de que tubulações metálicas tendem com o passar do tempo a acumular incrustações nas paredes internas do conduto, alterando a geometria (diâmetro interno, circularidade e rugosidade) interna da linha. Se isso for evidenciado, é bastante provável que o medidor de vazão estará apresentando erros de medida expressivos, e uma solução para esse problema é a remoção e limpeza do trecho de tubulação afetado.

4.3 Avaliação da instalação e configuração do elemento secundário

Ainda com base no *checklist* preenchido, deve ser realizada a avaliação da instalação e configuração do elemento secundário do sistema de medição de vazão a ser calibrado.

4.3.1 Avaliação da instalação do elemento secundário

A instalação de elemento secundário deve ser avaliada quanto aos aspectos de:

- **Acessibilidade:** o acesso do operador ao elemento secundário deve ser fácil, permitindo assumir uma posição apropriada e segura para a sua configuração ou manutenção;
- **Temperatura e umidade:** o elemento secundário não deve ficar exposto a níveis de temperatura e de umidade ambiental acima dos limites especificados pelo fabricante;
- **Irradiação solar e ambientes corrosivos:** o elemento secundário deve ser protegido contra irradiação solar intensa e ambientes corrosivos que possam aquecer ou promover a oxidação dos seus componentes;

- **Vibração:** o elemento secundário não deve ser exposto a níveis de vibração mecânica acima do limite especificado pelo fabricante;
- **Proteção física:** sempre que possível, o elemento secundário deve ser instalado em caixa ou armário metálico (conforme exemplo apresentado na **Figura 22**), de modo a garantir as condições anteriores.



Fonte: IPT

Figura 22. Exemplo de instalação de elemento secundário em caixa metálica.

4.3.2 Avaliação da configuração do elemento secundário

Na configuração do elemento secundário, deve ser avaliada a adequação entre os valores da faixa de operação do medidor (que é fornecida pelo fabricante), os valores da faixa de vazão programada no medidor (*span*) e a sua faixa de vazão de trabalho.

Com relação à faixa de vazão programada no medidor (*span*), é recomendável prever uma margem de segurança para o caso da ocorrência de transitórios de vazão e operações fora da rotina e, assim, a vazão máxima de operação deve corresponder a aproximadamente 75 % do *span* de vazão. Por exemplo, para um medidor no qual a vazão máxima de operação esperada é de 750 L/s, o valor do *span* será determinado por:

<i>span</i>	<input type="checkbox"/>	100 %
750 L/s	<input type="checkbox"/>	75 %

logo:

$$span = \frac{750 \text{ L/s} \cdot 100 \%}{75 \%} = 1000 \text{ L/s}$$

Ou seja, para uma vazão máxima de operação de 750 L/s, o valor de *span* adequado a ser programado no secundário será de 1000 L/s.

Outra questão a ser analisada é se a faixa de vazão de trabalho está inclusa na faixa de operação do medidor, fornecida pelo fabricante. Isto é, a vazão mínima de trabalho não pode ser menor que a vazão mínima de operação do medidor e, da mesma forma, a vazão máxima de trabalho não pode ser maior que a vazão máxima de operação do medidor.

4.4 Instalação da estação pitométrica

A técnica de pitometria aplicada à medição de vazão de água se baseia no levantamento do perfil de velocidades do escoamento no interior da tubulação em pontos específicos localizados ao longo do seu diâmetro de varredura. O perfil de velocidades medido permite o cálculo da velocidade média do escoamento e, com a medida do diâmetro interno da tubulação, é possível se calcular a área da seção transversal do tubo e, conseqüentemente, se determinar a vazão de água.

Para o levantamento dos perfis de velocidades do escoamento é necessária a instalação de *taps* de pitometria em uma estação pitométrica. De acordo com Frangipani, M. [12] uma estação pitométrica é basicamente a seção transversal da tubulação utilizada para a realização das medições de vazão de água por pitometria, sendo composta do poço de visita (PV) para acesso ao conduto no caso de linhas enterradas, e do registro de derivação, também comumente chamado de *tap*, que se constitui em um dispositivo metálico cuja função é permitir o acesso ao fluido mediante a sua instalação na parede externa da tubulação através do qual se possibilita a inserção do tubo de Pitot do tipo Cole em carga, ou seja, sem interromper o escoamento de água.

O *tap* é similar a uma válvula do tipo esfera e é fabricado com dimensões padronizadas, normalmente de uma ou de duas polegadas de diâmetro nominal, fato que permite a sua instalação em tubulações em carga utilizando-se nesse caso um equipamento específico denominada máquina Mueller, bem como o seu acoplamento ao tubo de Pitot.

4.4.1 Descrição do *tap* comercial

Atualmente, são encontradas no mercado várias versões de *taps*, sendo em sua maioria com roscas padrão ABNT ou com roscas Whitworth (padrão americano ou Mueller).

Para possibilitar a padronização dos equipamentos utilizados na preparação da estação pitométrica (broca da máquina Mueller, acoplamento do tubo de Pitot), é importante que sejam utilizados *taps* sempre de mesmo padrão. Dentre os modelos disponíveis, recomenda-se o padrão ABNT, que se encontra descrito na **Figura 23**, a seguir:



Exemplo de *tap* de uma polegada, padrão ABNT:

- rosca superior: BSP paralela de 1 ¼" (11 fpp)
- rosca inferior: BSP cônica de 1" (11 fpp)
- fabricado em bronze

Figura 23. Exemplo de *tap* padrão ABNT de uma polegada.

Por sua vez, o *tap* padrão Mueller apresenta as seguintes dimensões principais:

- rosca superior: Whitworth 1 ½" – 11 fpp
- rosca inferior: Whitworth 36,2 – 12 fpp – conicidade: 1:8

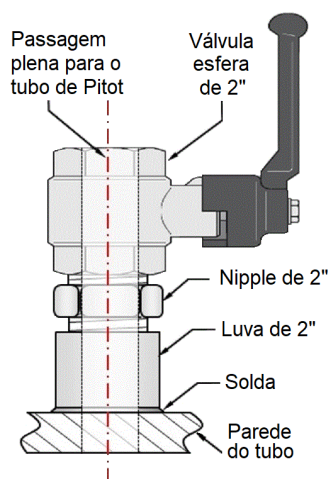
A **Tabela 2** apresenta as características de alguns *taps* comercialmente disponíveis no Brasil.

Tabela 2. Características de *taps* comerciais.

Ø Diâmetro	Material Fabricado	Comprimento Total	Rosa Superior BSP paralela	Rosca Inferior BSPT cônica	Rosca Interna BSP
½"	Bronze	78 mm	¾"	½"	---
¾"	Bronze	90 mm	1"	¾"	---
1"	Bronze	100 mm	1 ¼"	1"	¾"
1"	Bronze	100 mm	1 ¼"	1"	---
1 ½"	Bronze	146 mm	2"	1 ½"	---
2"	Bronze	185 mm	2 ½"	2"	---

4.4.2 Alternativa ao *tap* comercial

Caso não se tenha disponível um *tap* comercial, é possível instalar um *tap* de pitometria composto de uma luva metálica soldada na parede externa da tubulação sobre um furo executado previamente, um *nipple* e uma válvula do tipo esfera de passagem plena. A rosca da válvula esfera deve ser do tipo BSP. Esse conjunto de conexões e válvula esfera deve permitir a livre inserção do tubo de Pitot do tipo Cole no interior da tubulação, conforme mostrado na **Figura 24**.



Fonte: IPT.

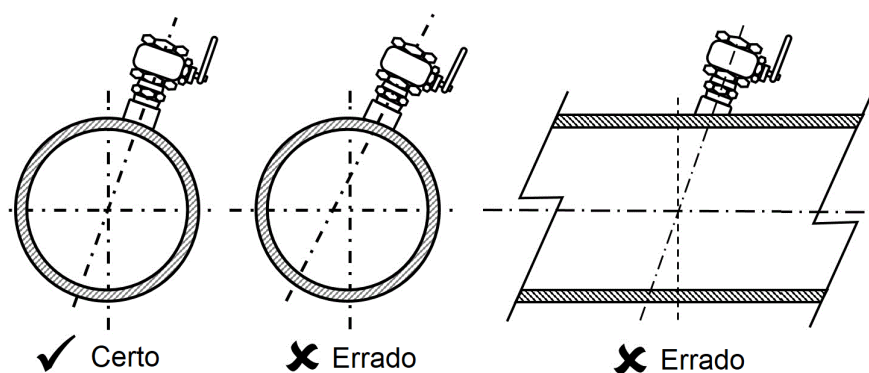
Figura 24. Esquema de instalação de *tap* por meio de luva soldada na parede da tubulação.

IMPORTANTE: Observar que a solda da luva tem de ser realizada com extremo cuidado de forma a garantir que a trajetória de passagem do tubo de Pitot cruze o eixo

da tubulação. Se for avaliado que a fixação do *nipple* diretamente à tubulação por meio de roscas é uma alternativa viável à soldagem de uma luva, para a medição da vazão por pitometria em si não há problemas. Essa alternativa vai depender essencialmente da espessura da parede da tubulação.

4.4.3 Cuidados com a instalação do *tap*

O levantamento do perfil de velocidades do escoamento deve ser realizado ao longo do diâmetro do tubo na seção de medição. Para que isso possa ser feito de forma correta, a instalação do *tap* deve ser realizada com todo o cuidado para garantir a ortogonalidade do eixo do *tap* com o eixo da tubulação. Com isso, a direção da haste do tubo de Pitot deve necessariamente cruzar o eixo da tubulação e ser perpendicular ao mesmo, conforme mostrado na **Figura 25**.

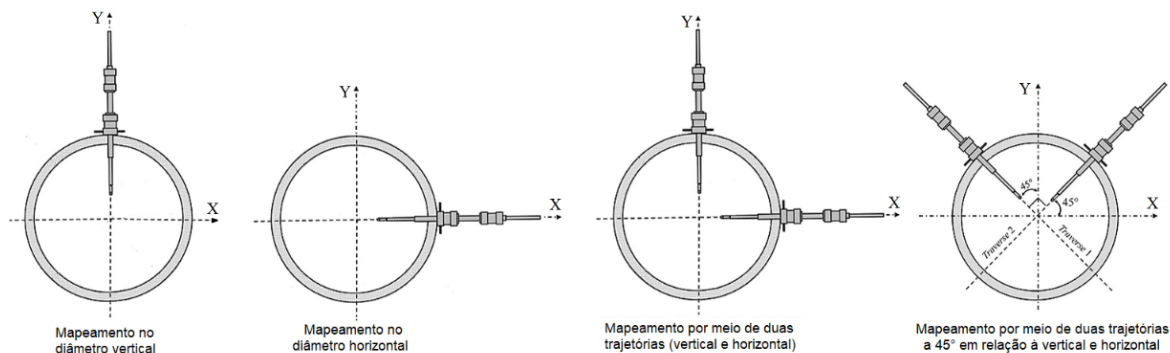


Fonte: IPT

Figura 25. Ortogonalidade do eixo do *tap* com o eixo da tubulação.

4.4.4 Tipos de instalação de *taps*

O mapeamento do perfil de velocidades do escoamento pode ser realizado em um ou dois diâmetros da tubulação. A medição da vazão por meio do mapeamento em dois diâmetros tende a ser mais efetiva, principalmente em situações onde assimetrias ou perturbações no perfil de velocidades do escoamento possam estar presentes. A **Figura 26** apresenta os tipos de instalação de *taps* mais utilizados na prática da pitometria.



Fonte: IPT

Figura 26. Tipos de instalação de *taps* de pitometria.

Uma vez instalado, o *tap* permite a inserção do tubo de Pitot para a realização da pitometria, conforme ilustrado na **Figura 27**.

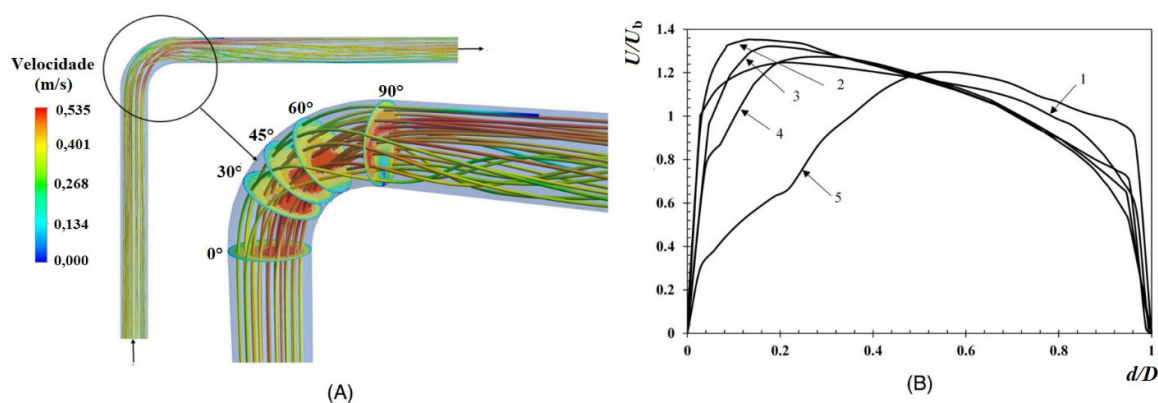


Fonte: IPT

Figura 27. Exemplo de *tap* instalado e inserção de tubo de Pitot.

4.4.5 Escolha do local de instalação da estação pitométrica

Bombas hidráulicas, válvulas e conexões como curvas, tês e derivações tendem a perturbar as condições do escoamento de um fluido no interior de um conduto dando origem a turbulências de larga escala, assimetrias no perfil de velocidades do escoamento e, muitas vezes, fluxos helicoidais que persistem por longas distâncias a jusante da origem da perturbação. A **Figura 28** mostra um exemplo de simulação da perturbação em um escoamento de um fluido ocorrendo a um número de Reynolds da ordem de 10 000 causada por uma curva de 90° localizada a montante.



(A) Linhas de velocidade e contornos de velocidade (em detalhes) da curva em $Re = 10\,000$. (B) Perfis das velocidades em diferentes seções transversais para a curva em $Re = 10\,000$

Figura 28. Exemplo de perturbação em um escoamento de um fluido.

Nesse sentido, a escolha correta do local de instalação da estação pitométrica é condição primordial para a realização de uma boa medição, uma vez que na seção de medição o escoamento deveria estar plenamente desenvolvido e estável, preferencialmente com os vetores velocidade do escoamento axissimetricamente distribuídos e alinhados paralelamente ao eixo da tubulação.

A avaliação do local de instalação da estação pitométrica se baseia fundamentalmente na análise das potenciais fontes de perturbação ao escoamento presentes a montante do local, na verificação do comprimento mínimo disponível de trechos retos de tubulação a montante e a jusante da seção do conduto onde será realizada a pitometria, assim como das condições de instalação do(s) *tap(s)* de pitometria e de realização das medições. Em ambos os casos, deve-se seguir, sempre que possível, as determinações de normas nacionais ou internacionais.

Antes da escolha do ponto para instalação de estação pitométrica, o conduto alvo da prática pitométrica deverá ser localizado, caso esteja enterrado. Para tanto, dados cadastrais e desenhos são as fontes imediatas para a obtenção de informações. Caso as informações disponíveis não sejam confiáveis, outro recurso poderá ser a utilização de um equipamento localizador de condutos metálicos.

Uma vez localizado o conduto, a escolha do ponto para instalação da estação pitométrica deverá ser feita mediante a verificação da existência de um trecho reto de tubulação suficientemente longo. Com relação aos comprimentos mínimos de trechos retos de tubulação disponíveis, a norma a ser utilizada é a NBR ISO 3966 [11], que estabelece que os trechos retos de tubulação possuam pelo menos 20 diâmetros de comprimento a montante e 5 diâmetros a jusante da seção de instalação da estação pitométrica. Trechos retos mais longos sempre favorecerão a qualidade da medição. A razão disso é que trechos retos de tubulação contribuem para o condicionamento de um escoamento eventualmente perturbado a montante do ponto de medição.

Quando forem constatadas altas velocidades de escoamento ou a existência de válvulas ou conexões geradoras de perturbações severas no escoamento a montante da estação pitométrica, o comprimento de trecho reto total poderá ser elevado para 70 vezes o diâmetro do conduto, sendo 50 à montante e 20 à jusante.

O ponto para instalação da estação pitométrica deve ficar distante, no mínimo, 20 metros de qualquer rede ou equipamento de alta tensão. Este requisito visa evitar curtos circuitos causados por eventuais vazamentos de água sob pressão decorrente de abertura ou de rompimento do tubo no local do *tap*.

Quando da definição do local da estação pitométrica dentro de um perímetro urbano, evitar entradas de garagens, oficinas, escolas, comércio e locais com muita movimentação de veículos, o que poderia atrapalhar o trabalho da equipe de pitometria e colocar em risco as pessoas.

4.4.6 Características operacionais da estação pitométrica

Para que a medição de vazão de água em condutos forçados por meio das práticas pitométricas apresente resultados confiáveis, deverão ser observadas as condições abaixo:

- o diâmetro nominal do conduto a ser medido deve ser igual ou superior a 200 mm (8 polegadas). Para tubos de diâmetros menores, o efeito de obstrução da área da seção transversal do conduto devido à inserção da haste do tubo de Pitot no escoamento tenderá a proporcionar medidas de velocidade incorretas;
- a velocidade da água no conduto deve ser superior a 0,3 m/s, valor que corresponderia teoricamente a uma pressão diferencial da ordem de 60 Pa gerada nas tomadas de pressão do tubo de Pitot;
- a pressão manométrica no ponto de medição deveria ser superior a 30 kPa (cerca de 3 mca) para que a altura manométrica da haste do tubo Pitot seja vencida e a pressão diferencial seja transmitida ao transmissor de pressão ou manômetro;
- a presença de bolhas ou bolsões de ar no escoamento de água deverá ser evitada pois isso ocasiona erros de medida com o tubo de Pitot. Portanto, para a seleção do local de instalação da estação pitométrica deverão ser evitados os trechos altos na tubulação.
- Outro fator importante para a uma boa pitometria é a estabilidade da vazão do fluido, que deverá ser mantida o mais estável possível durante o processo de medição.

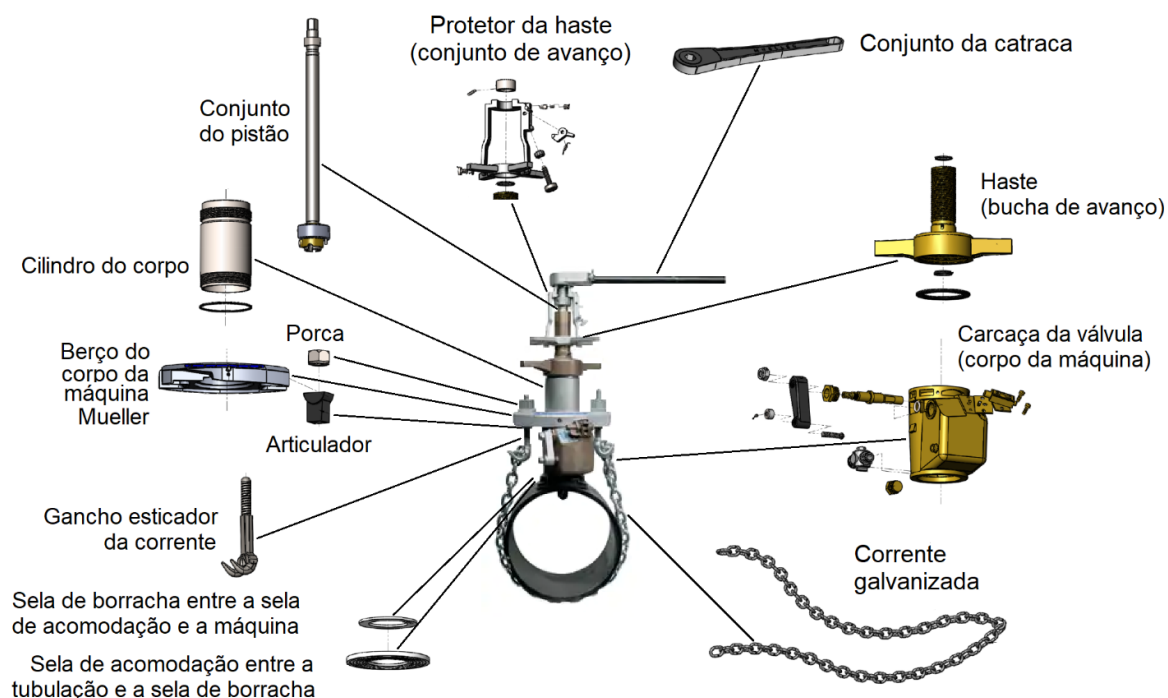
Além dessas condições, recomenda-se atentar que a pressão máxima de trabalho para utilização da técnica de pitometria é normalmente de 2 MPa (20 bar). Para operações em condições de pressão mais elevadas, devem ser tomadas todas as precauções necessárias referentes à instrumentação, conexões, mangueiras, válvulas e procedimentos operacionais utilizados.

4.4.7 Procedimento para a instalação do *tap*

Em tubulações enterradas é necessária a abertura de uma vala no local de instalação da estação pitométrica, com área em planta suficiente para a acomodação adequada de dois operadores e a manipulação segura do tubo de Pitot. Nesse caso, se a vala possuir uma profundidade superior a dois metros, é importante a utilização de escoramento nas paredes.

O trecho da tubulação deverá ser totalmente desenterrado, deixando um pequeno vão sob o mesmo para permitir a passagem da corrente de fixação da máquina que será utilizada para perfurar a tubulação e instalar o *tap*.

Para a instalação do *tap* em uma tubulação de ferro fundido ou de aço em carga pode ser utilizada a máquina do tipo Mueller, que apresenta as características mostradas na **Figura 29**.



Fonte: adaptado de MUELLER® B-101™ Drilling & Tapping Machine Parts List

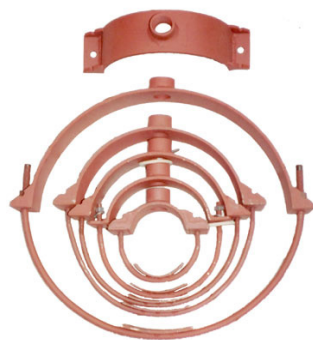
Figura 29. Principais componentes na máquina Mueller para furação e instalação de *taps* em tubulações em carga.

4.4.8 Cuidados na instalação conforme o material da tubulação

Para a correta instalação do *tap* alguns cuidados devem ser considerados conforme o material de fabricação do tubo.

- **Tubulação de PVC**

Quando a tubulação for de PVC (policloreto de vinila) a instalação do *tap* deverá ser de acordo com a pressão manométrica e poderá ocorrer de duas formas: sob pressão de até 1,5 bar (15 mca), a instalação do *tap* poderá ser de acordo com o procedimento adotado para a tubulação de ferro fundido ou aço; acima de 1,5 bar (15 mca), a instalação do *tap* deverá ser feita com o uso de um colar de tomada (**Figura 30**). Esta operação é realizada com rede fechada (fora de carga), ou com a utilização de máquina para perfurar por dentro do *tap*.



Fonte: Frangipani, M. [12]

Figura 30. Colares de tomada para a instalação de *taps* em tubulações.

- **Tubulação de cimento amianto**

Neste caso, a instalação do *tap* só é recomendável com a utilização do colar de tomada.

- **Tubulação de ferro fundido**

Neste caso, a perfuração da tubulação pode ser realizada sem nenhum procedimento preliminar, uma vez que a sua espessura e rigidez atendem às exigências para a instalação do *tap*.

- **Tubulação de aço**

Caso a espessura da parede da tubulação não seja espessa, poderá ser necessário soldar no local da furação uma chapa de aço de 20 cm × 20 cm × 5 mm, para que possa ser garantida a quantidade de fios de rosca necessários para a instalação do *tap*.




4.4.9 Operação da máquina Mueller

A seguir, são apresentadas as etapas de operação da máquina Mueller para a perfuração e instalação de *taps* em tubulações.

Observa-se que, para maior clareza, os procedimentos foram realizados utilizando-se um trecho de tubo. No entanto, na situação real, na maioria das vezes, os procedimentos são executados dentro de uma vala. Desta forma, é importante ter em mente os procedimentos de instalação quando da construção da vala, garantindo-se espaço suficiente para os operadores da máquina.

NOTA: As fotografias constantes deste item foram reproduzidas do documento *Guia Prático de Ensaios Pitométricos*, de autoria de Márcio Frangipani, elaborado em 2005 no âmbito do Programa de Modernização do Setor Saneamento – PMSS, da Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Ministério das Cidades, Governo Federal.








- Instalação da máquina

PASSO 1	PASSO 2	PASSO 3
		
Escolher a sela de acomodação que melhor se adapta à superfície da tubulação.	Colocar a sela de borracha e a sela de acomodação.	Colocar o anel de vedação da máquina.
OBS: Verificar a posição em que será instalado o <i>tap</i> . Lembrar que posteriormente deverá haver altura suficiente para a instalação do tubo de Pitot		

PASSO 4	PASSO 5	PASSO 6
		
Colocar o corpo da máquina, verificando se está perfeitamente horizontal. O "flap" e o "by-pass" devem estar abertos.	Instalar o gancho da corrente.	Envolver a tubulação com a corrente.

PASSO 7	PASSO 8	PASSO 9
		
Encaixar a corrente no gancho esticador.	Verificar o alinhamento do corpo da máquina com relação à corrente.	Apertar as porcas dos ganchos, alternadamente, até que a máquina esteja bem fixada.

- Execução do furo e da rosca

PASSO 1	PASSO 2	PASSO 3
		
Instalar a broca no conjunto do pistão. O parafuso de fixação deve ser firmemente apertado.	Inserir o pistão com a broca no corpo da máquina.	Rosquear o conjunto do pistão no corpo da máquina. Descer o pistão até sentir que a broca encostou na tubulação.
PASSO 4	PASSO 5	PASSO 6
		
Ajustar o conjunto de avanço do pistão, aproximando a trava do eixo.	Prender o pistão com a trava do eixo.	Instalar a catraca.
PASSO 7	PASSO 8	PASSO 9
		
Iniciar a furação com movimentos firmes e contínuos, evitando dar trancos na catraca para não danificar a broca.	Durante a furação, controlar o avanço da broca, girando o protetor da haste no sentido horário.	Fechar o “by-pass” quando vazar água, indicando que o furo está iniciando.






PASSO 10	PASSO 11	PASSO 12
		
O término do furo poderá ser sentido quando folgar a catraca.	Girar lentamente o protetor da haste no sentido horário até sentir que o macho da broca encostou no furo.	Iniciar a execução da rosca, contando o número de voltas da catraca.
<p>OBS: Número de voltas (número de fios de rosca)</p> <p>Tubo com diâmetro ≥ 300 mm: de 7 a 8 voltas completas.</p> <p>Tubo com diâmetro entre 100 mm e 300 mm: de 4 a 5 voltas completas.</p>		
PASSO 13	PASSO 14	PASSO 15
		
OBS: Para facilitar a contagem, recomenda-se que seja realizada uma marcação no corpo do eixo.	A figura acima ilustra a penetração da broca, quando da realização da rosca.	Ajustar a catraca para rosca inversa.
PASSO 16	PASSO 17	PASSO 18
		
Iniciar a retirada da broca.	CUIDADO: Ao remover a trava do eixo, conforme a pressão da rede, o pistão pode "saltar".	Fechar o "flap", observando seu travamento.

PASSO 19	PASSO 20	
		
Remover o conjunto do pistão.	OBS: Pode-se visualizar na broca o número de fios executados na rosca.	

- Instalação do *tap*

PASSO 1	PASSO 2	PASSO 3
		
Preparar o <i>tap</i> instalando os adaptadores. Colocar fita veda-rosca na rosca do <i>tap</i> .		Verificar se o <i>tap</i> se encontra na posição fechada.

PASSO 4	PASSO 5	PASSO 6
		
Instalar o <i>tap</i> conforme os procedimentos de instalação da broca. Reinstalar o conjunto do pistão no corpo da máquina, seguindo os mesmos passos anteriores.		Após rosquear o conjunto do pistão, proceder à abertura do "by-pass".

PASSO 7	PASSO 8	PASSO 9
		
Com o “by-pass” aberto, proceder à abertura do “flap”.	Rosquear o <i>tap</i> no tubo, contando o número de fios rosqueados.	Após rosquear o <i>tap</i> , girar a catraca no sentido anti-horário com movimento brusco, visando desacoplar o pistão do <i>tap</i> .
PASSO 10	PASSO 11	PASSO 12
		
Abrir o “by-pass” para observar o escoamento de água. Se o <i>tap</i> tiver sido instalado corretamente, não haverá o escoamento de água.	Proceder à desmontagem da máquina.	<i>Tap</i> instalado.

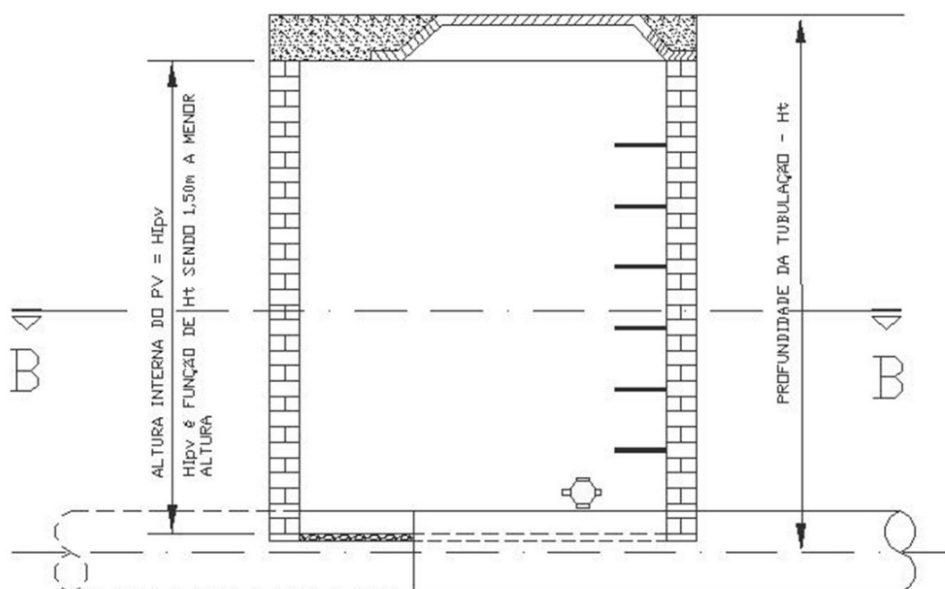
Uma vez instalado o *tap*, providencia-se o desmonte da máquina com limpeza total de seus componentes e acessórios, guardando-os em seguida na caixa de proteção para transporte.

4.4.10 Construção da caixa abrigo da estação pitométrica

Para as aplicações onde a medição de vazão de água por pitometria é uma atividade rotineira, é indicada a construção de uma caixa em alvenaria para abrigar a estação pitométrica e proteger os *taps* instalados.

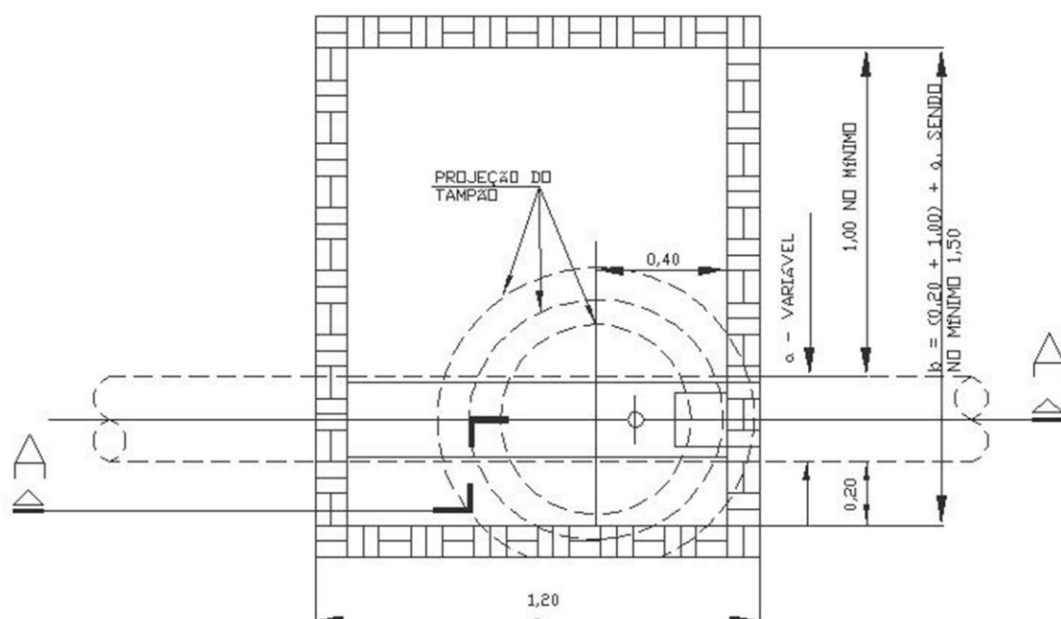
Em tubulações enterradas, a caixa abrigo da estação pitométrica, deve ter espaço suficiente para a instalação e a manipulação do tubo Pitot em um ou dois diâmetros de varredura e a acomodação conjunta de equipamentos tais como mangueiras, transmissores de pressão, *notebook*, mesa pequena ou base de apoio e outros equipamentos.

As **Figuras 31** e **32** apresentam as dimensões recomendadas para a caixa abrigo. Observa-se que, conforme a profundidade da tubulação, o *tap* deve ser instalado na lateral ou na parte inferior da tubulação. Lembrar que podem ocorrer situações em que o tubo de Pitot deverá permanecer instalado por longo tempo, no caso da necessidade de registro continuado da vazão e, para tanto, a caixa deverá ser fechada para proteção e guarda do mesmo.



Fonte: Frangipani, M. [12]

Figura 31. Vista em corte de uma caixa abrigo de estação pitométrica.

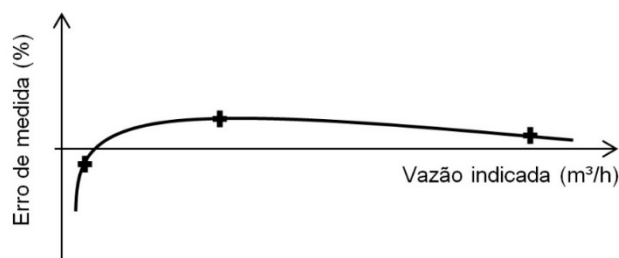


Fonte: Frangipani, M. [12]

Figura 32. Vista em planta de uma caixa abrigo de estação pitométrica.

4.5 Escolha das vazões de calibração

Devido aos princípios de operação, projetos, materiais e tecnologias construtivas utilizadas, muitos tipos e modelos de macromedidores de vazão se caracterizam por apresentar erros de medida que variam em função da vazão indicada pelo mesmo. Dessa forma, sempre que possível, a calibração de um macromedidor de vazão de água deveria ser realizada em pelo menos três vazões diferentes dentro da faixa de vazões de operação do local onde está instalado o medidor, de modo a tornar possível a construção de uma curva de erro de medida do medidor calibrado em função da vazão ou do número de Reynolds do escoamento, conforme ilustrado simplificado no esquema da **Figura 33**.

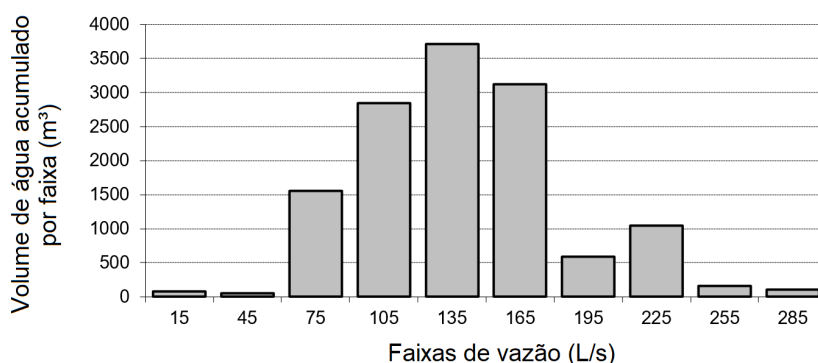


Fonte: IPT

Figura 33. Exemplo de curva de calibração de medidor de vazão

Para definir os pontos ou vazões de calibração, deveriam ser previamente obtidos os registros de vazão de trabalho, por exemplo, dos últimos doze meses para que esses dados sirvam de base para a escolha das vazões de calibração.

Preferencialmente, dever-se-ia utilizar um histograma de volume acumulado como avaliador da faixa de trabalho típica do medidor em calibração, conforme mostrado na **Figura 34**.



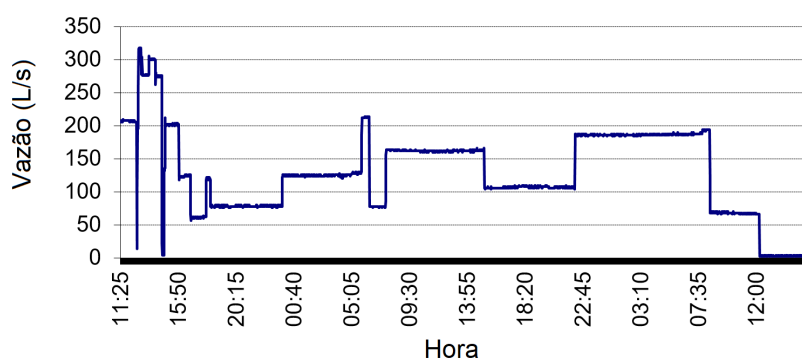
Fonte: IPT

Figura 34. Exemplo de histograma de volume acumulado.

Para construir o histograma utilizando o registro de vazões deve-se:

- dividir a faixa de trabalho em 10 intervalos de vazão iguais. Por exemplo, o medidor do histograma anterior apresenta uma faixa de vazão que vai de 0 a 300 L/s e foi dividida em dez intervalos de 30 L/s de largura cada.
- anotar os registros de vazão, um-a-um, identificar em qual dos dez intervalos ele se encontra e multiplicar pelo intervalo de aquisição do registro de vazões. O resultado desta operação será o volume de água totalizado no intervalo escolhido. Esse volume vai sendo somado aos outros volumes que tenham valores de vazão dentro do mesmo intervalo de vazão que ele pertence. Desse modo, obtidos os volumes acumulados para cada um dos dez intervalos de vazão, pode-se construir o histograma.

Outro parâmetro avaliador da faixa de operação do medidor de vazão é o gráfico de vazão instantânea mostrado na **Figura 35**.



Fonte: IPT

Figura 35. Exemplo de gráfico de vazão instantânea

Para o caso particular de medidores que medem as vazões de água em estações de bombeamento, que alimentam grandes reservatórios, pode-se determinar as vazões de calibração em função do número de bombas em funcionamento.

4.6 Configuração da instrumentação do *kit* de pitometria

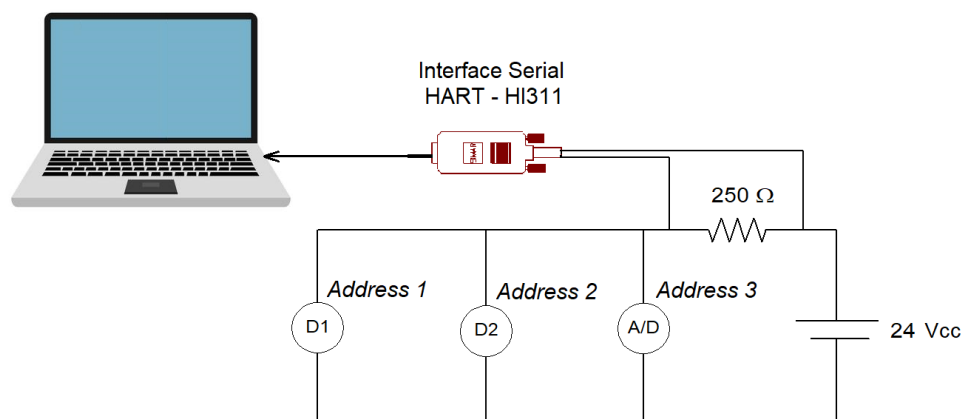
O *kit* de pitometria desenvolvido pelo IPT é um sistema constituído por um conjunto de transdutores de pressão e conversor analógico digital que se comunicam entre si utilizando o protocolo *Hart*.

Esta parte do manual tem o objetivo de apresentar a configuração e a integração dos instrumentos com um computador de campo (*notebook*), possibilitando a sua utilização na calibração de macromedidores de vazão de água por mapeamento do perfil de velocidades do escoamento com o uso de tubo de Pitot do tipo Cole.

4.6.1 O *kit* de pitometria

O *kit* de pitometria utilizado para a calibração de medidores de vazão de água por diferencial de pressão, tais como tubos de Venturi, tubos de Dall, placas de orifício, Annubars e outros, é o mesmo utilizado para a calibração de medidores de vazão eletrônicos dos tipos eletromagnético, ultrassônico etc.

Na **Figura 36** é apresentado o esquema elétrico para transdutores de pressão diferencial e para conversores A/D operando em um circuito de malha fechada com protocolo *Hart* de comunicação.



Fonte: IPT

Figura 36. Arranjo elétrico de equipamentos *Hart*.

Observa-se que, no arranjo, os instrumentos D1, D2, A/D estão ligados em paralelo, utilizando seus terminais de alimentação Vcc (corrente contínua). A este conjunto é ligada, em série, uma resistência *shunt* de 250 Ω onde é conectado o cabo que faz a conexão com o computador de campo (*notebook*), que é chamado de Interface Serial HART - HI311.

A Interface Serial (RS232) HI311 permite a comunicação entre instrumentos de campo que utilizam o protocolo Hart e computadores padrão IBM. Ela é compacta, em peça única e não necessita de alimentação externa.

A interface HI311 é projetada para trabalhar com o *software* de configuração CONF401, assim como com outros *softwares* de comunicação Hart que utilizem a porta serial RS232.

Suas características são:

- operação com produtos Hart de vários fabricantes;
- alimentação pela porta RS232/USB Serial, não necessitando de alimentação externa;
- conector para porta RS232/USB Serial.

4.6.2 Configuração

A seguir, serão detalhados os procedimentos de configuração necessários para a operação do *kit* de pitometria:

- Configuração do microcomputador para trabalhar com o *software* PACTware
- Acessando os *devices* (equipamentos presentes na malha Hart)
- Configuração dos transdutores de pressão
- Configuração do conversor analógico digital

4.6.2.1 Configuração do microcomputador para trabalhar com o *software* PACTware

Neste documento será apresentado o PACTware, um *software* aberto utilizado na operação de dispositivos, sistemas e interfaces de comunicação. Ele possui a tecnologia FDT (*Field Device Tool*), possibilitando a operação de equipamentos via DTM (*Device Type Managers*) e está disponível para *download* em *sites* de diversos fabricantes de instrumentos de medição.

1. Realizar o *download* e proceder a instalação do *software* PACTware. Neste documento é utilizado o PACTware 4.1 SP4, disponibilizado no endereço https://www.pepperl-fuchs.us/usa/en/classid_163.htm?view=productdetails&prodid=45160#software;

OBSERVAÇÃO:

Antes de prosseguir para as próximas etapas, certifique-se de possuir o driver de seu "HART modem" instalado corretamente em seu computador. Caso não o possua, recomenda-se que entre em contato com o fornecedor do produto.

2. Realizar o *download* e proceder a instalação de uma DTM de comunicação entre "HART devices" e "HART modem" de sua preferência. Neste documento é utilizado a DTM "HART Communication FDT 1.2 DTM", da CodeWrights GmbH, disponível para download no endereço a seguir:

https://www.pepperl-fuchs.us/usa/en/classid_1804.htm?view=productdetails&prodid=32796#software;

3. Abrir o *software* PACTware;
4. Na barra de menus, selecionar “View”->”Device catalog”; conforme **Figura 37**. Se preferir, utilizar a tecla de atalho “F3”.

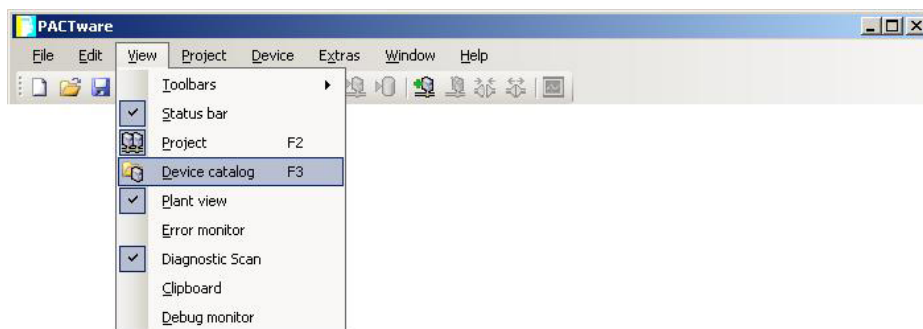


Figura 37. Opção “Device Catalog”.

- 4.1. Após o passo anterior, o programa deverá apresentar uma janela com a lista de DTM’s instaladas; semelhante ao exemplo da **Figura 38**.

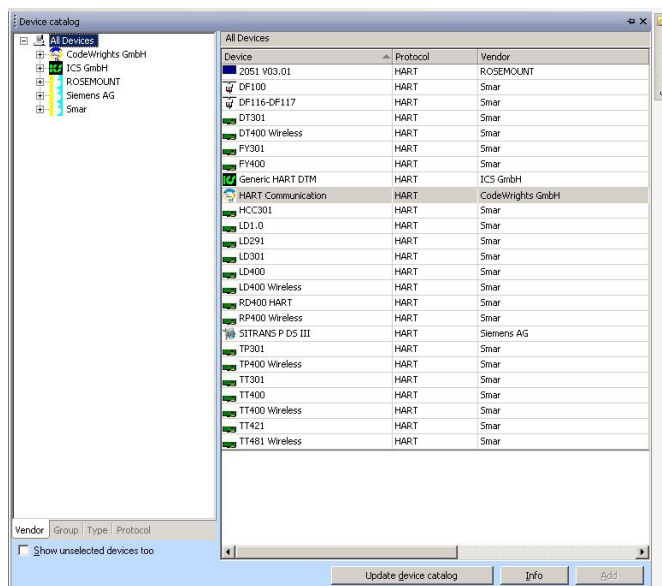


Figura 38. “Device Catalog”.

- 4.2. Clicar no botão e confirmar, caso necessário. Aguardar o programa concluir a atualização do “Device Catalog”.
- 4.3. Se tudo estiver correto, a janela “Device Catalog” irá apresentar a DTM do HART modem que foi instalada anteriormente; conforme **Figura 39**.

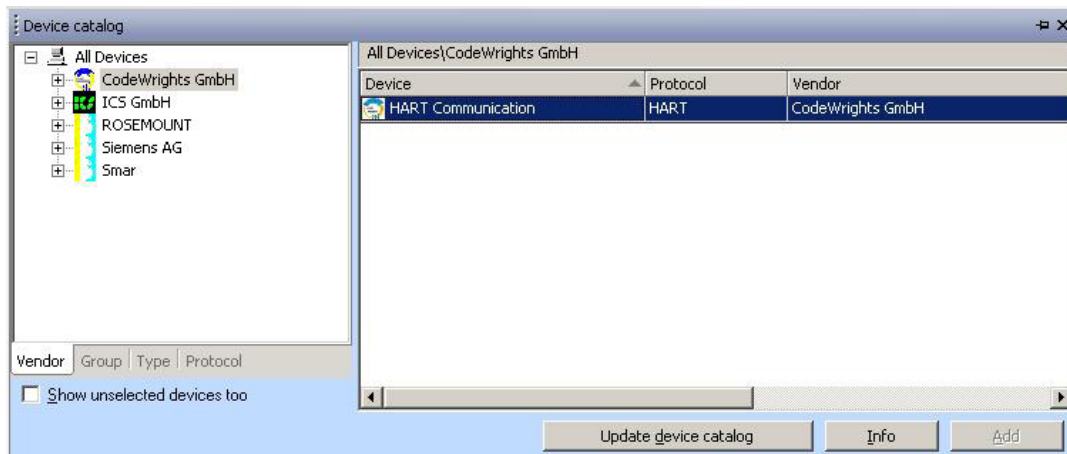


Figura 39. DTM Hart modem.

- Na aba de menus do PACTware, selecionar “Device”->”Add device”; conforme **Figura 40**.

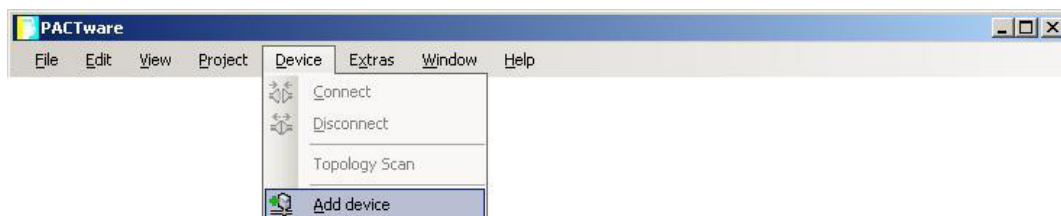
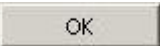


Figura 40. Opção “Add device”.

- A janela “Device for” será aberta. Selecionar a DTM referente ao “HART modem” e clicar no botão . Neste caso da **Figura 41**, a DTM apresentada é a “HART Communication”, pois foi ela a instalada nas primeiras etapas deste documento.

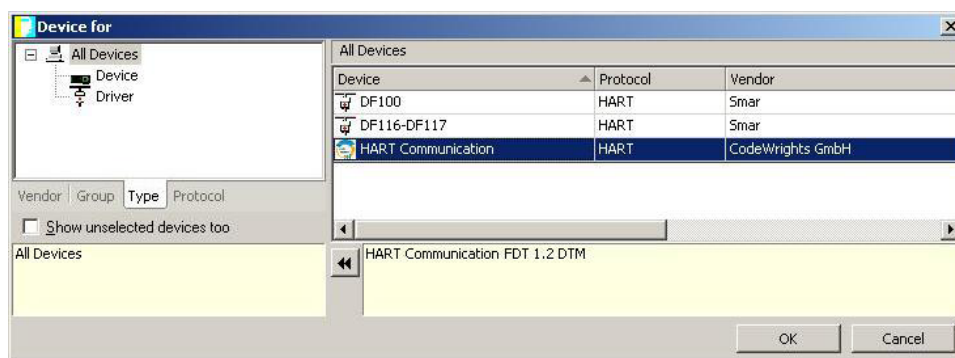


Figura 41. Janela “Device for”.

- Neste ponto, a janela “Project” deverá apresentar um device que representa o “HART modem”, com a propriedade “Device type (DTM)” igual à selecionada no passo anterior; conforme a **Figura 42**.



Figura 42. Janela Project após adicionar DTM do “HART modem”.

RECOMENDAÇÃO:

Antes de avançar para a próxima etapa, é recomendado conferir com qual COM o HART modem está vinculado. Fazer isso no Gerenciador de Dispositivos do Windows, na opção “Portas (COM & LPT)”, conforme apresentado na Figura 44.

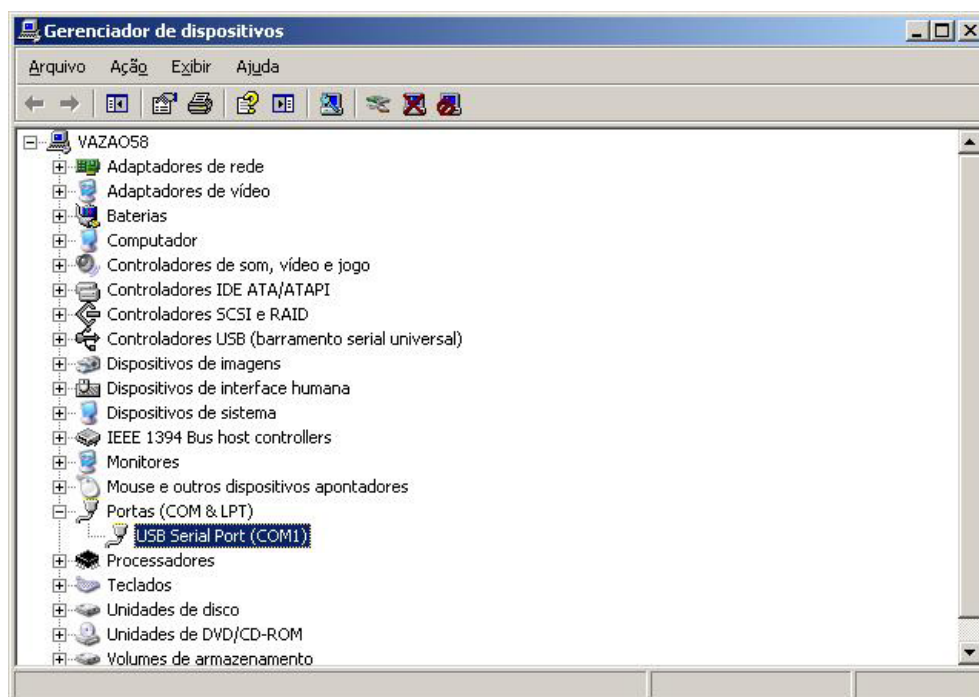


Figura 43. Portas (COM & LPT).

8. Com o device de seu “HART modem” SELECIONADO ir à barra de menus e selecionar “Device”->”Parameter” ou clicar com o botão direito do mouse sobre o device e ir em “Parameter”; conforme **Figura 44**.

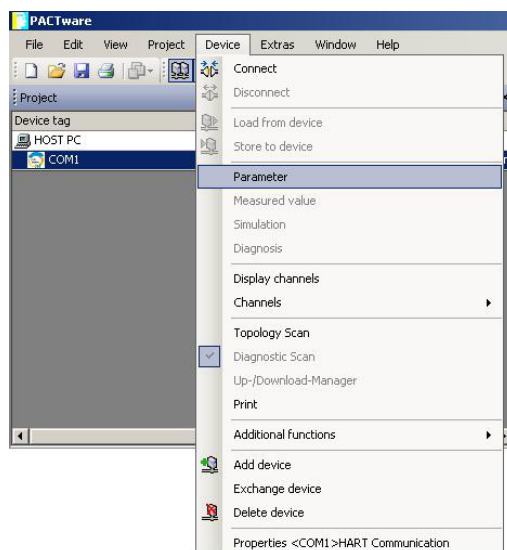


Figura 44. Opção “Parameter”.

9. Será aberta a janela e, se tudo estiver correto, será apresentada a configuração de parâmetros do “HART modem”; semelhante ao exemplo da **Figura 45**. As opções apresentadas podem sofrer leves variações de acordo com a DTM utilizada.

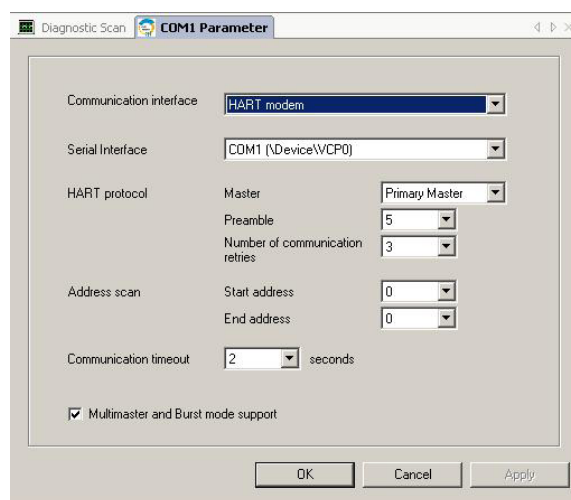
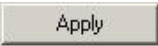
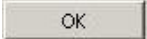


Figura 45. Parâmetros do “HART Modem”.

- 9.1. Se necessário, alterar a opção “Serial Interface” para a COM em que o “HART modem” se encontra. No campo “Address scan”, alterar as opções “Start address” e “End address” para o intervalo de endereços que deseja que o “HART modem” realize a busca por instrumentos. Para as demais opções, geralmente não é necessária nenhuma alteração e, assim, deixar como estiver.
- 9.2. Com tudo configurado, clicar no botão  e, em seguida, no botão .

Agora, tem-se o Framework FTD PACTware preparado para se comunicar com o “HART modem” via DTM. A próxima etapa é prepará-lo para se comunicar com os “HART devices”, também via DTM.

4.6.2.2 Acessando os *devices* (equipamentos presentes na malha Hart)

Para acessar um *device* da malha HART com o PACTware, é necessária uma DTM. Na maior parte dos casos, é possível obter a DTM no *site* do fabricante do equipamento. Neste documento, serão utilizados transdutores de pressão da Smar, portanto, será utilizado o pacote de DTM's fornecido pela Smar, identificado pelo nome "SMAR Devices Library Version 1.23 – Hart", disponibilizado no endereço <http://www.smar.com/en/support> (obs.: é necessário estar com acesso à Internet para a liberação dos links de download).

1. Fazer o *download* da DTM referente ao equipamento e prosseguir com a instalação do mesmo.
2. Após concluir o passo anterior, abrir o PACTware e, na barra de menus, ir a "View"->"Device Catalog", conforme **Figura 46**.

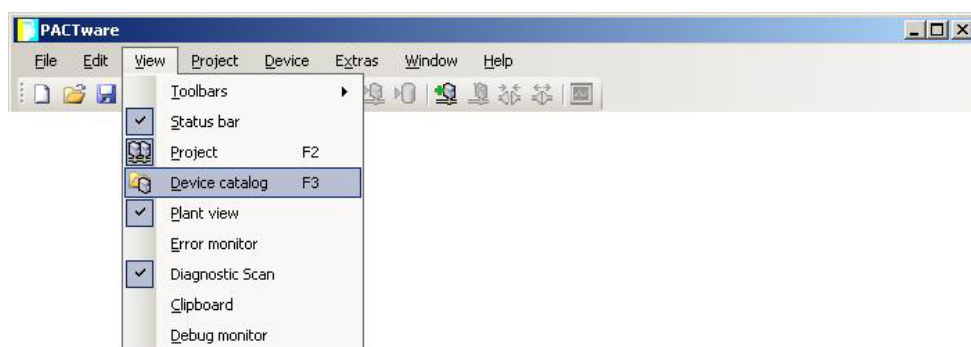


Figura 46. Opção "Device Catalog".

- 2.1. O programa apresentará a janela "Device Catalog"; semelhante ao exemplo da **Figura 47**.

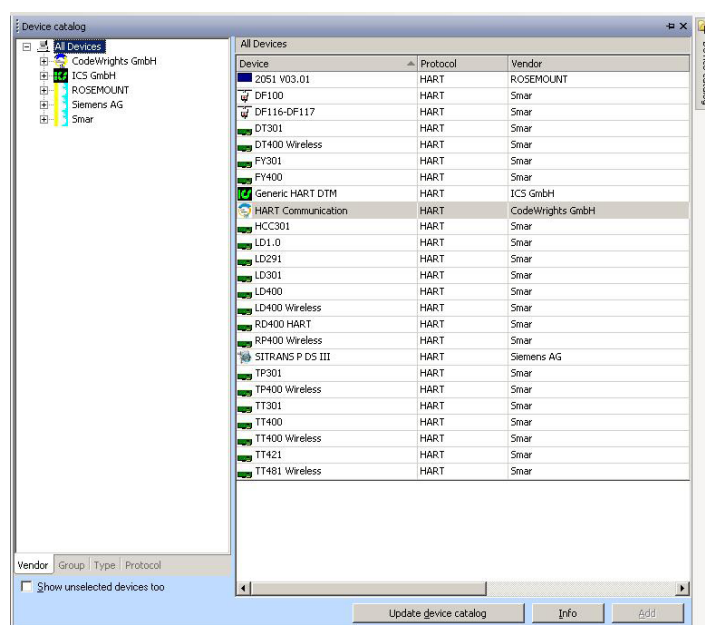
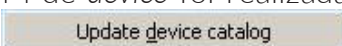


Figura 47. "Device Catalog".

- 2.2. Certificando-se de que a instalação da DTM de *device* foi realizada conforme instrução anterior, clicar no botão  e confirmar caso necessário. Aguardar o programa concluir a atualização do “Device Catalog”.
- 2.3. Se tudo estiver correto, a janela “Device Catalog” irá apresentar a DTM do modelo do instrumento que foi instalada anteriormente; conforme exemplo na **Figura 48**. Notar que as DTM’s apresentadas possuem a guia “Vendor” com o valor “Smar”, pois foi a DTM instalada neste documento. As DTM’s apresentadas na lista podem variar de acordo com a DTM que foi instalada.

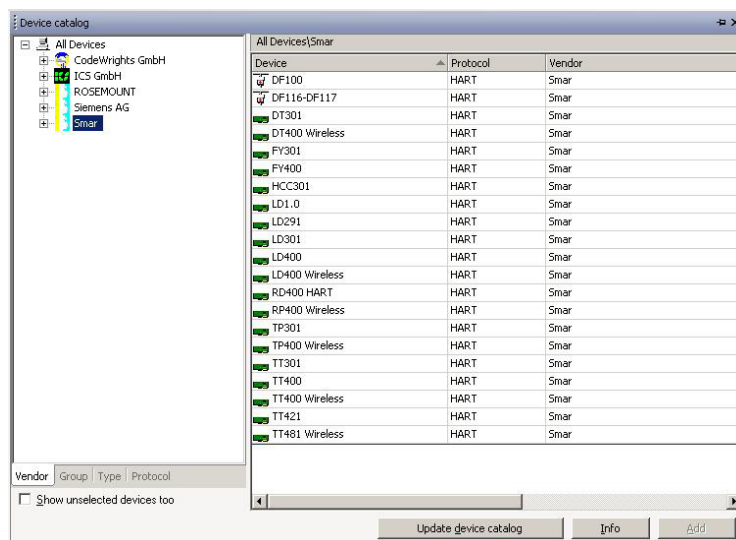


Figura 48. “Device Catalog” atualizado.

3. Para a primeira configuração dos instrumentos é necessário ligar à malha Hart, separadamente, cada instrumento, conforme apresentado no arranjo da **Figura 49**, de forma a definir o “**Address**” (endereçamento) dos equipamentos na malha Hart.

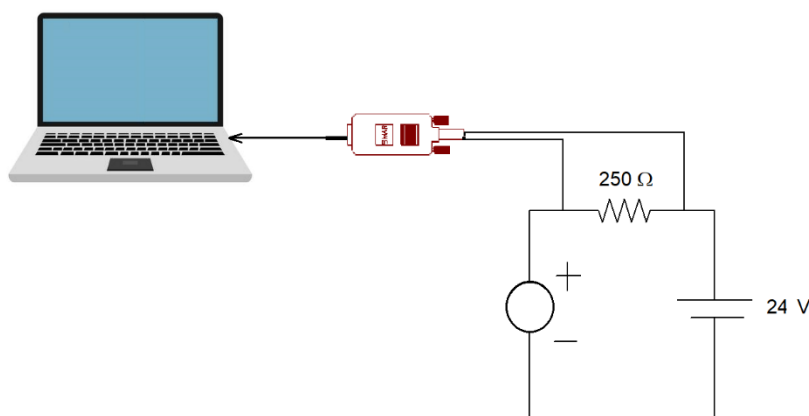


Figura 49. Arranjo para a configuração inicial do instrumento Hart.

Para os instrumentos do kit de pitometria, serão definidos os seguintes endereços:

- Transdutor de pressão de janela D1 “Address 1” (um).
- Transdutor de pressão de janela D2 “Address 2” (dois).
- Conversor analógico digital “Address 3” (três).

OBSERVAÇÃO:

O sistema de comunicação HART, consegue se comunicar com até 16 instrumentos HART (Address 0 a 15) ligados em “MULTIDROP”, ou operando simultaneamente na mesma malha. O instrumento correspondente ao endereço “0” (ZERO) é chamado de “MESTRE” e todos os outros endereços de 1 a 15 são chamados de “ESCRAVOS”.

A diferença entre eles é que os instrumentos denominados “ESCRAVOS” têm sua saída de corrente congelada em 4 mA e o instrumento denominado “MESTRE” continua com sua saída de corrente habilitada (descongelada). Isto provém das características do protocolo de comunicação HART.

4. Após montar o arranjo da **Figura 49**, abrir o PACTware, adicionar e configurar um *device* para o “HART modem”, conforme instruções apresentadas no tópico anterior “Configuração do microcomputador para trabalhar com o software PACTware”. Ao final, se obterá o *device* para o “HART modem” apresentado na janela “Project” já configurado para se comunicar com os demais *devices* da malha HART, conforme exemplo da **Figura 50**.

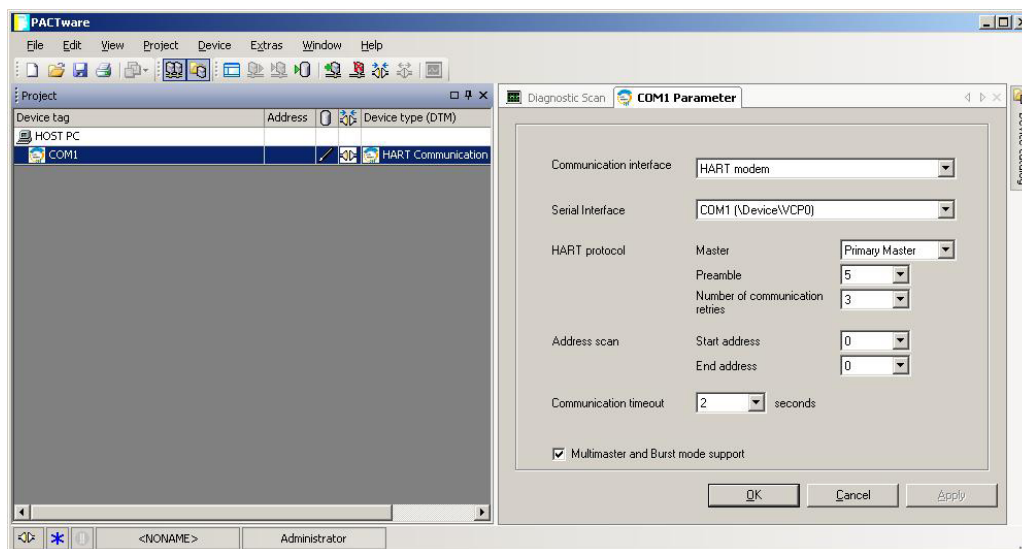


Figura 50. Device para o “Hart modem” configurado e pronto para uso.

- 4.1. Na janela “Project”, selecionar o *device* referente ao “HART modem”. Então, ir à barra de menus em “Device”->“Connect”, conforme **Figura 51** ou clicar com o botão direito do mouse sobre o *device* e clicar na opção em “Connect”.

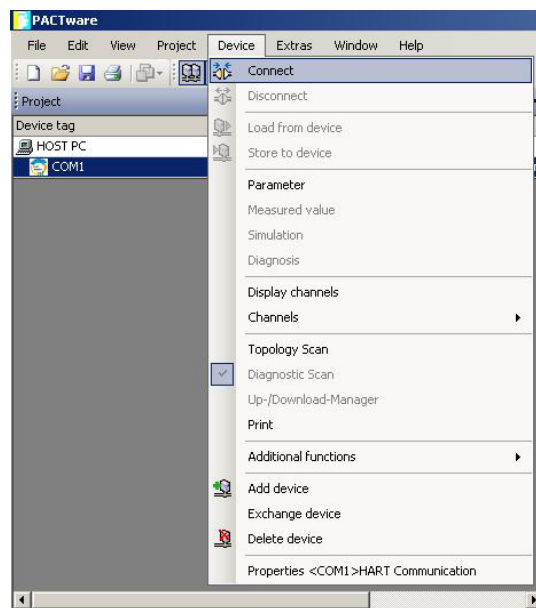




Figura 51. Opção “Connect”.

- 4.2. Ainda na janela “Project”, certificar-se que o ícone  (desconectado) mudou para  (conectado).
5. Na janela “Project”, selecionar o *device* referente ao “HART modem”. Então, ir à barra de menus em “Device”->”Topoly Scan”, conforme a **Figura 52** ou clicar com o botão direito do mouse sobre o *device* e clicar na opção em “Topology Scan”.

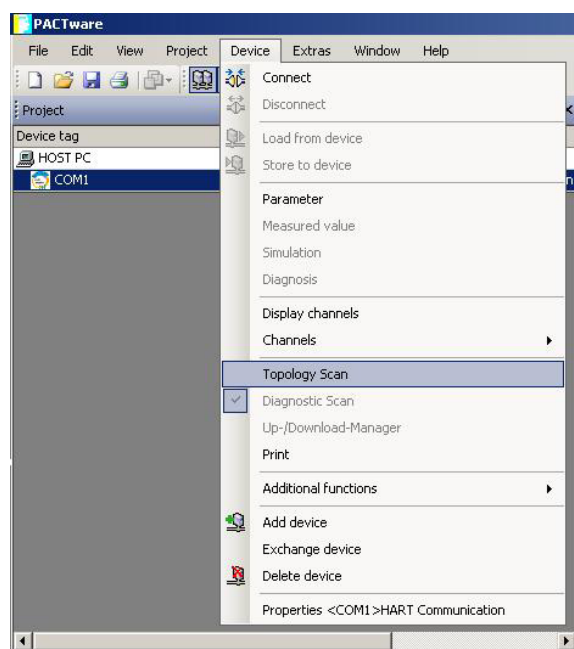


Figura 52. Opção “Topology Scan”.

- 5.1. Deverá ser apresentada a janela “Topology Scan”, conforme a **Figura 53**.

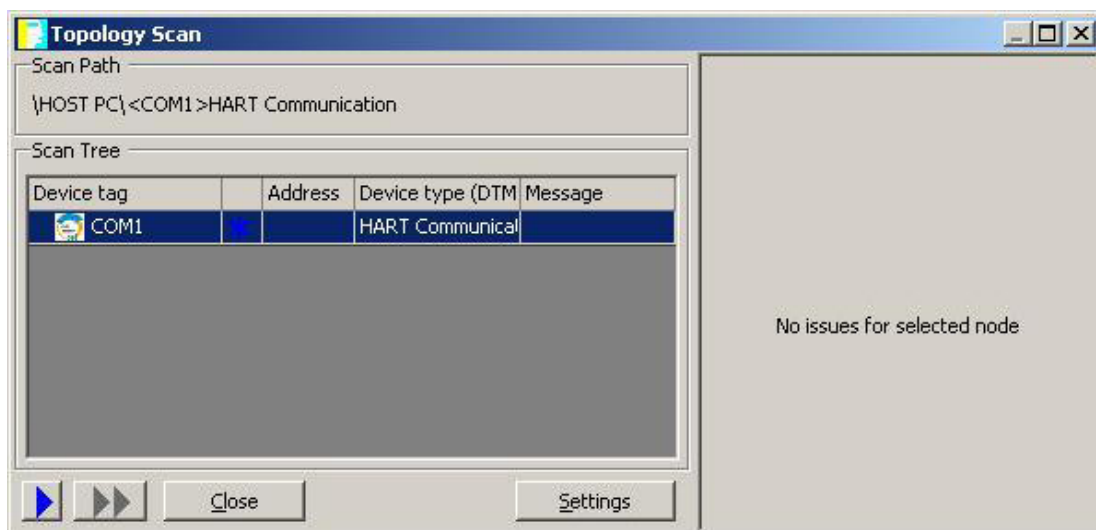



Figura 53. Janela “Topology Scan”.

ATENÇÃO:

Não deve haver conflito de endereçamento entre os *devices*. Ou seja, não pode haver dois ou mais instrumentos com o mesmo endereço. A configuração *standard* (configuração padrão de fábrica), vem com todos os instrumentos com endereçamento “0” (zero), de tal forma que os instrumentos devem ser configurados separadamente para não haver conflito de endereços.

- 5.2. Clicar no botão  e aguardar o PACTware terminar a busca pelos instrumentos na malha HART. Ao término do processo, deverá ser apresentado o *tag* do instrumento na posição logo abaixo do *device* do “HART modem”, conforme a **Figura 54..**

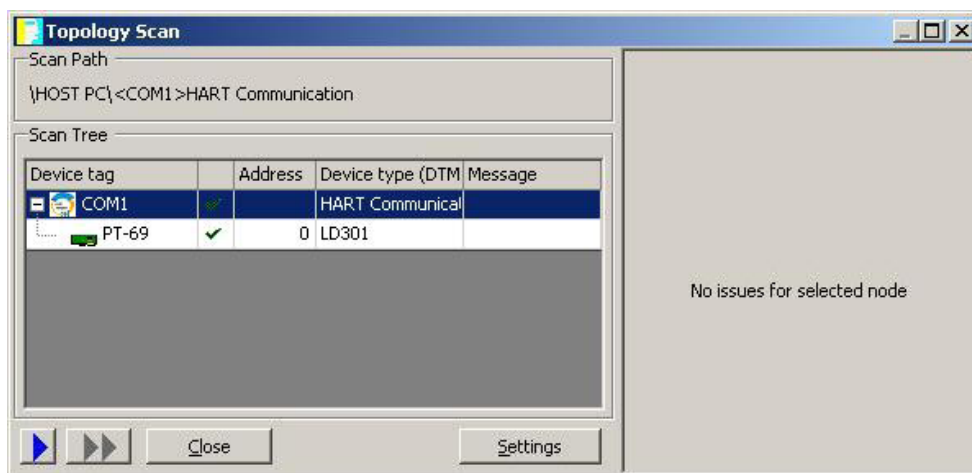




Figura 54. Janela “Topology Scan” após executar a varredura.

- 5.3. Fechar a janela “Topology Scan” clicando no botão  ou no botão .

6. Na janela “Project”, selecionar o *device* encontrado após a varredura correspondente ao “instrumento HART”. Então, ir à barra de menus em “Device”->“Connect”, conforme **Figura 55** ou clicar com o botão direito do mouse sobre o *device* e clicar na opção em “Connect”.

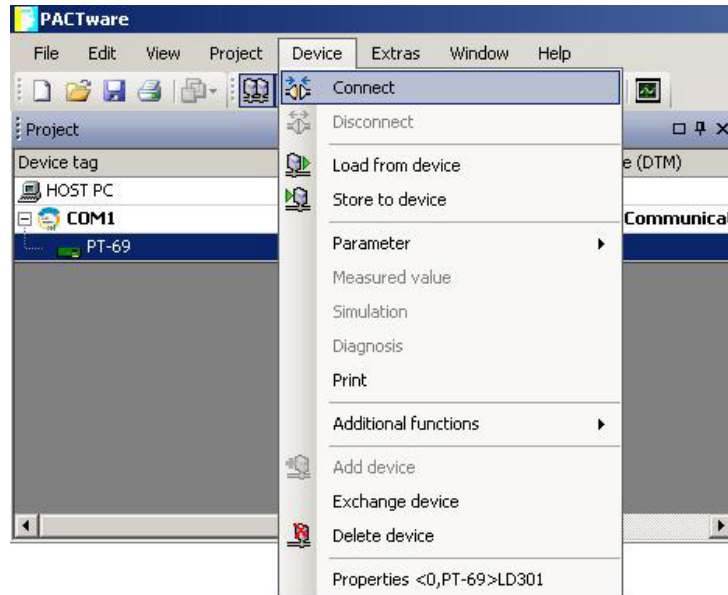


Figura 55. Opção “Connect” para o instrumento HART.

- 6.1. Com o instrumento já conectado, na janela “Project” deixá-lo selecionado e ir à barra de menus e selecionar “Device”->“Parameter”->“Online parameterization”, conforme **Figura 56**, ou clicar com o botão direito do mouse sobre o *device* e selecionar “Parameter”->“Online parameterization”.

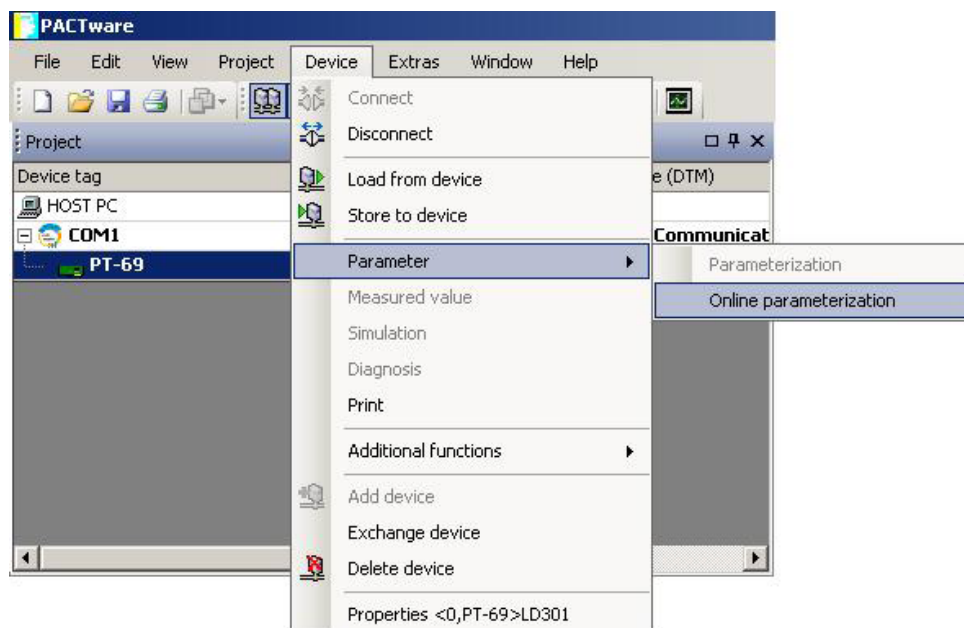


Figura 56. Opção “Online parameterization”.

- 6.2. Deverá ser apresentada uma janela semelhante ao exemplo da **Figura 57**. Obs.: As informações contidas nessa janela sofrem alterações de acordo com o instrumento conectado. Neste exemplo, é utilizado um transmissor de pressão modelo Smar LD301.



Figura 57. Janela “Online parameterization”.

7. Expandir as opções a seguir clicando no ícone **+**, “Online Parameterize”->”Blocks”->”General”. Então, selecionar a opção “Multidrop”. Com isso, deve aparecer uma opção para alterar o endereço do instrumento na malha HART, similar ao exemplo da **Figura 58**.



Figura 58. Opção “Multidrop”.

- 7.1. Na opção “Polling Address” selecionar o canal respectivo ao instrumento conectado à malha HART. Ou seja, D1 com “Address 1”, D2 com “Address 2” e o conversor A/D com “Address 3”.
- 7.2. Após selecionar o Address correto, confirmar a alteração no endereço do instrumento clicando no botão **Write** e reconfirmar a alteração caso o programa assim o solicitar.

8. Repetir os passos anteriores para os demais instrumentos.

ATENÇÃO:

Há casos em que a DTM fornecida pelo fabricante não disponibiliza uma opção para alterar o “Address” do instrumento. É o caso do conversor A/D utilizado como exemplo neste documento.

Se ocorrer a situação descrita anteriormente, prosseguir para o “Passo 9”. Caso contrário, avançar para “Configuração dos transdutores de pressão”. Do “Passo 9” em diante, será considerado que a DTM do “HART modem” é a mesma utilizada neste documento. Ou seja, “HART Communication FDT 1.2 DTM” da CodeWrights GmbH.

9. Ir ao endereço https://www.pepperl-fuchs.us/usa/en/classid_1804.htm?view=productdetails&prodid=32798#software, e fazer o download do arquivo “Generic HART DTM / Generic HART DTM” e instalá-lo.

OBSERVAÇÃO:

Esse arquivo é uma DTM genérica para instrumentos HART fornecida livremente pela ICS. Permite que sejam feitas a leitura e a escrita de algumas configurações padrão do protocolo HART. Infelizmente, não permite alterar o “Address” do instrumento. Porém, permite que mesmo sem uma DTM específica, se possa adicionar este instrumento ao “Project” no PACTware e, então, comunicar o instrumento com o “HART modem”.

- 9.1. Após efetuar a instalação, prosseguir com os passos para atualizar o “Device Catalog” do PACTware, conforme instruções apresentadas no “Passo 2”, deste tópico.
- 9.2. Se tudo estiver correto, o “Device Catalog” deverá apresentar a DTM com nome “Generic HART DTM” tendo “ICS GmbH” como “Vendor”, conforme a **Figura 59**.

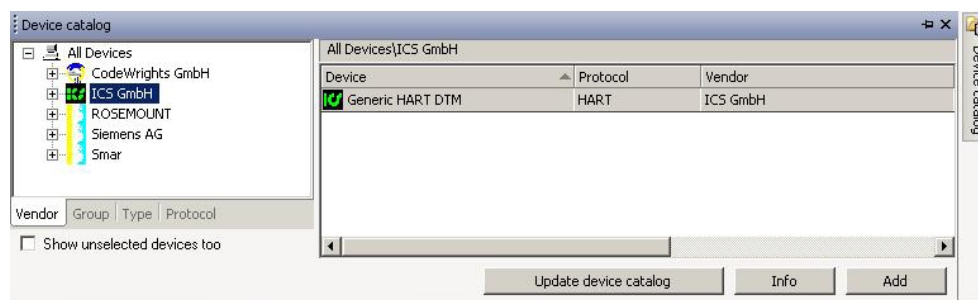


Figura 59. “Generic HART DTM” instalada.

10. Prosseguir com as instruções do “Passo 3” ao “Passo 5”.
11. Neste ponto, o usuário deverá estar com sua janela “Project” apresentando pelo menos um *device* correspondente ao seu “Hart modem” e outro *device* correspondente ao seu instrumento; conforme exemplo da **Figura 60**.



Figura 60. Janela “Project” com “Hart modem” e instrumento “Generic HART”.

12. Conectar o *device* referente a “HART modem”, selecioná-lo e ir à barra de menus em “Device” > “Additional functions” > “Change device address”, conforme a **Figura 61** ou clicar com o botão direito do mouse sobre o *device* e selecionar “Additional functions” > “Change device address”.

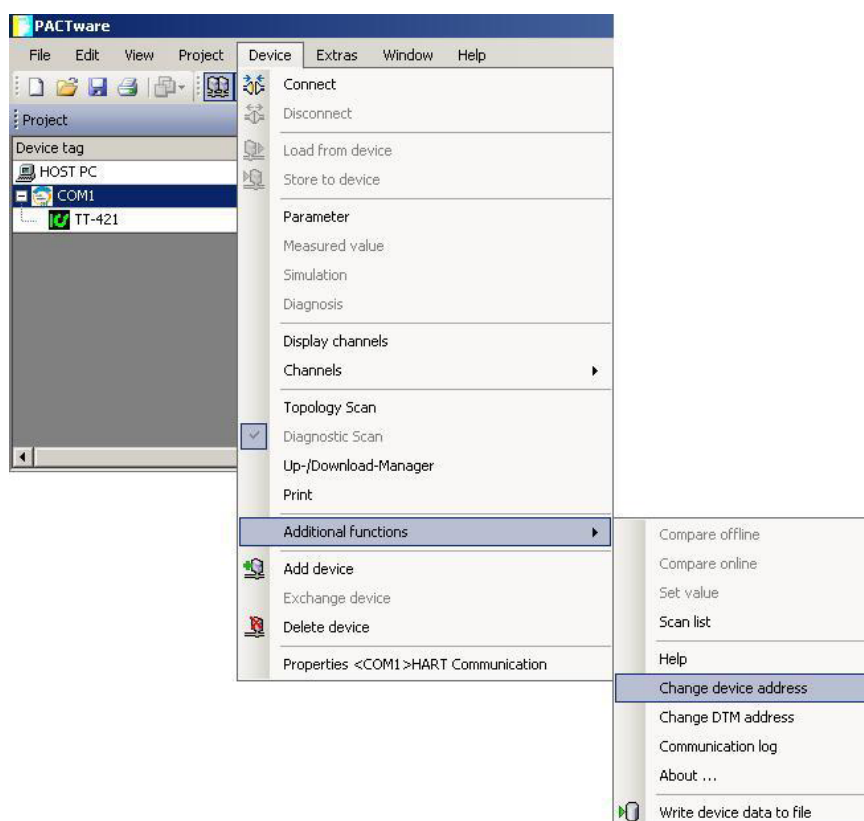


Figura 61. Opção “Change device address”

- 12.1. O programa deverá apresentar a janela “COMx # Change device address” conforme o exemplo da **Figura 62**.

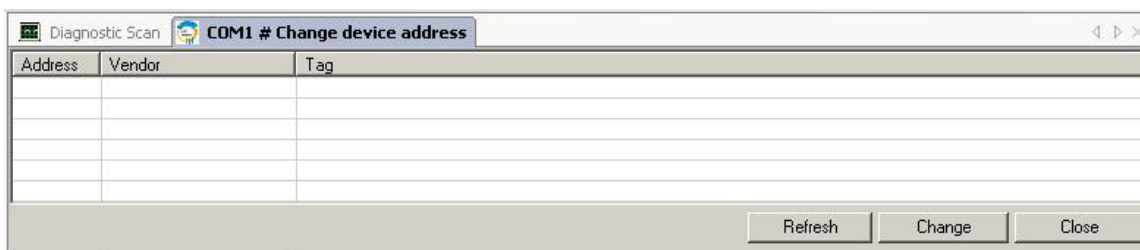


Figura 62. Janela “COMx # Change device address”.

- 12.2. Certificar-se de que o *device* do “HART modem” está conectado e, então, clicar no botão **Refresh**. Ao terminar o processo, a janela “COMx #Change device address” deverá apresentar uma lista com todos os *devices* exceto o de seu “Hart modem”; conforme exemplo na **Figura 63**.

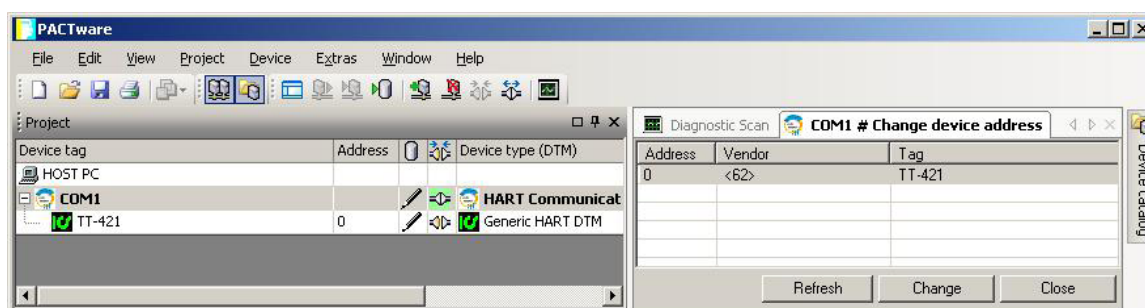


Figura 63. Janela “COMx # Change device address” após o “Refresh”.

- 12.3. Na janela “COMx #Change device address”, dar um duplo clique sobre o *device* desejado. Será apresentada uma nova janela, conforme o exemplo da **Figura 64**.



Figura 64. Janela “Change HART address”.

- 12.4. Alterar a opção “New Address” para o valor desejado e, em seguida, confirmar clicando no botão **OK**. Com isso, o instrumento estará com o “Address” configurado para o endereço desejado, apesar de apresentar o “Address” anterior na janela “Project”.
13. (Este passo é opcional): Após alterar o endereço dos instrumentos da malha HART, é recomendável reiniciar o PACTware para que as informações de endereçamento sejam atualizadas.
- Agora, os instrumentos estarão configurados para o “Address” definido no início deste tópico, com ou sem uma DTM específica, conforme a **Figura 65**.

OBSERVAÇÃO:

É importante ressaltar que após a configuração dos instrumentos e a determinação dos seus respectivos endereços, D1 com “Address 1”, D2 com “Address 2” e A/D com “Address 3”, o acesso poderá ser feito com todos os instrumentos ligados em *multidrop* (na mesma malha), podendo ser acessados, configurados ou monitorados, simultaneamente.

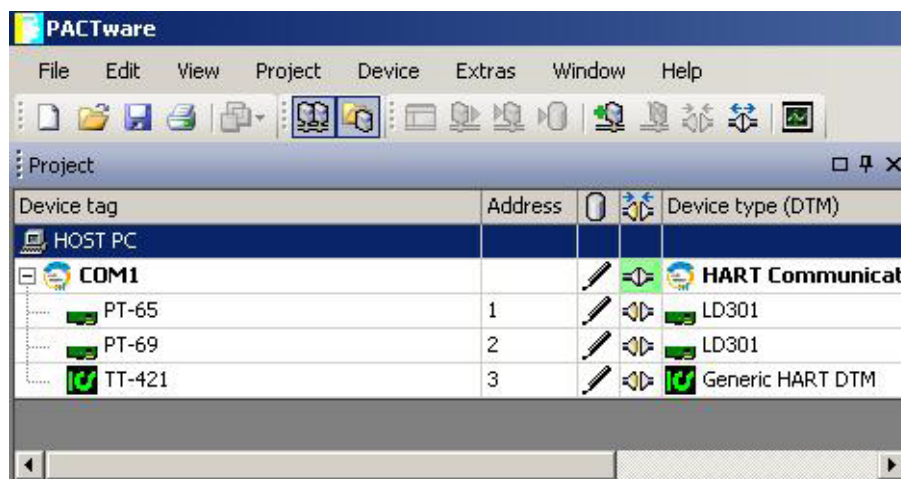


Figura 65. Relação de *devices* conectados.

4.6.2.3 Configuração dos transdutores de pressão

Os transdutores de pressão denominados como D0, D1 e D2 são utilizados para a medição das pressões diferenciais advindas do Pitot do tipo Cole, sendo que cada um possui uma faixa de operação diferente de modo a abranger uma faixa ampla de valores de pressão diferencial possíveis de serem gerados pela sonda. A **Tabela 3** apresenta as faixas de operação desses transdutores de pressão.

Tabela 3. Faixas de operação dos transdutores de pressão diferencial

Transdutor	Faixa de Operação (mmca)
D0	5 - 100
D1	12,5 - 500
D2	42 - 5000

OBSERVAÇÃO:

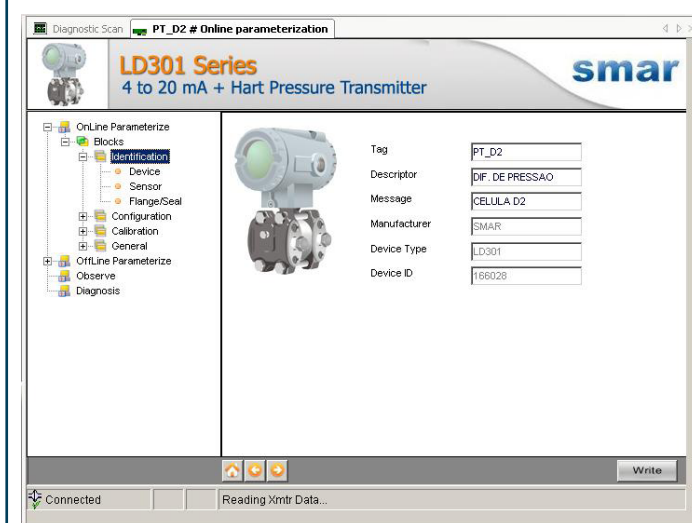
Faixas de operação válidas somente para transmissores modelo LD301 da SMAR.

Antes de prosseguir, preparar a malha HART no PACTware com o “HART modem” e os demais instrumentos. Conectar o transdutor desejado e abrir a opção “Online Parameterization”.

Nas figuras seguintes (**Figura 66, Figura 67, Figura 68, Figura 69, Figura 70, Figura 71 e Figura 72**), pode-se observar que as configurações entre os transdutores de pressão de janelas D1 e D2 diferem apenas em relação à faixa de trabalho (*range*)

e tag. Por esse motivo, a apresentação das tabelas será feita de forma genérica para ambos os transdutores de pressão.

ITEM: "IDENTIFICATION"



Ao observar a figura ao lado, pode-se notar que há na parte esquerda uma série de opções para acesso às configurações dos itens, tais como *range*, *trim*, *monitor*, *multidrop* etc. referentes ao instrumento acessado.

No item "**Identification**" selecionado na figura ao lado, acessa-se as informações de fábrica dos instrumentos.

Parâmetros que devem ser configurados:

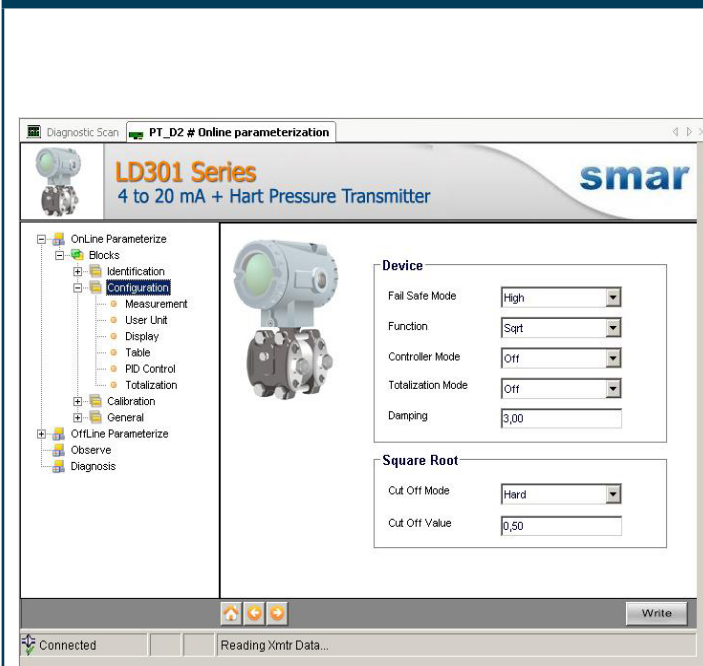
Tag: "PT_D2"

Descriptor: "DIF. DE PRESSAO"

Message "CELULA D1 ou CELULA D2"

Figura 66. Configuração de um transmissor de pressão.

ITEM: "CONFIGURATION"



Neste item, configuram-se os parâmetros relacionados à segunda variável (*), onde se define a função matemática para o instrumento aplicar sobre sua PV (variável de processo) e seu *cut-off* que representa o percentual de corte na variável a partir do seu zero.

Foi adotado o *Damping* de 3 segundos, definido por meio de testes, como o melhor valor para o tempo de resposta do sistema como um todo.

Parâmetros que devem ser configurados:

Function: "Sqrt"

Cut Off Mode: "Hard"

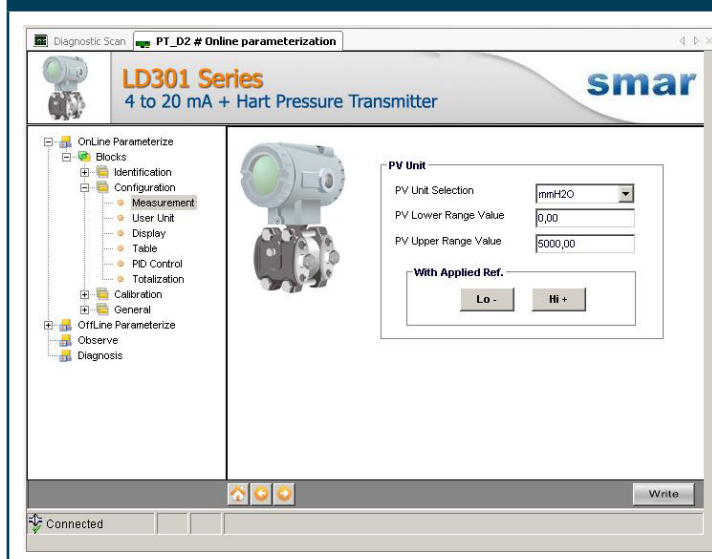
Cut Off Value: "0,50"

Damping: "3,00"

(*) OPCIONAL

Figura 67. Configuração de um transmissor de pressão (cont.).

ITEM: "CONFIGURATION" > "MEASUREMENT"



Neste item, configuram-se os parâmetros relacionados à variável a ser medida pelo instrumento, tais como a faixa efetiva de trabalho e sua aplicação em relação ao processo a ele empregado.

Parâmetros que devem ser configurados:

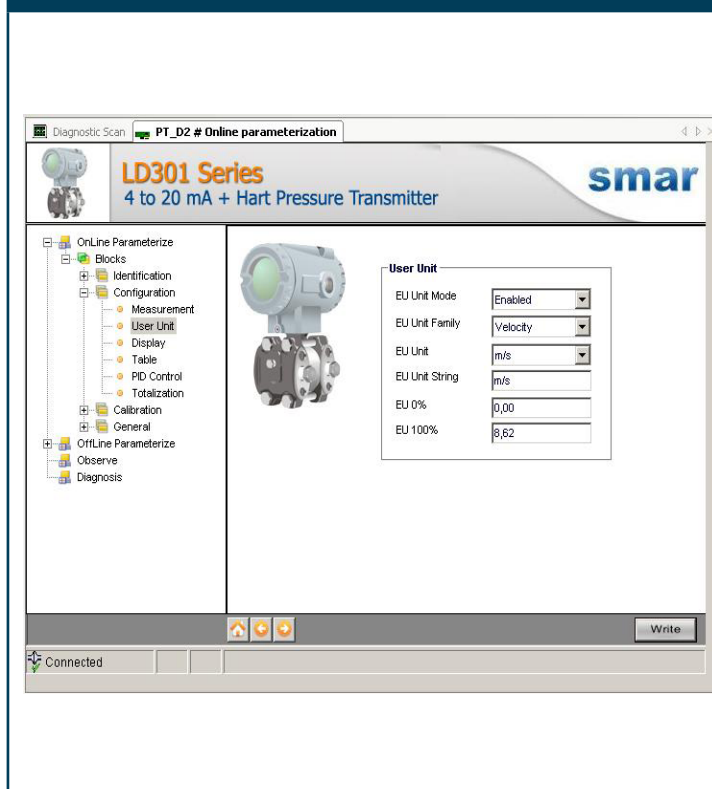
PV Unit Selection: "Unidade da Grandeza Física"

PV Lower Range Value: "Valor de Início de Faixa"

PV Upper Range Value: "Valor de Fim de Faixa"

Figura 68. Configuração de um transmissor de pressão (cont.).

ITEM: "CONFIGURATION" > "USER UNIT"



Neste item definem-se os valores de 0 e 100%, onde também define-se a grandeza física a ser medida com a aplicação da função matemática definida no item "configuration".

Parâmetros que devem ser configurados:

EU Unit Mode: "Enabled"

EU Unit Family: "Grandeza Física da 2ª Variável (**Velocity**)"

EU Unit: "Unidade da Grandeza Física da 2ª Variável (**m/s**)"

EU Unit string: "m/s"

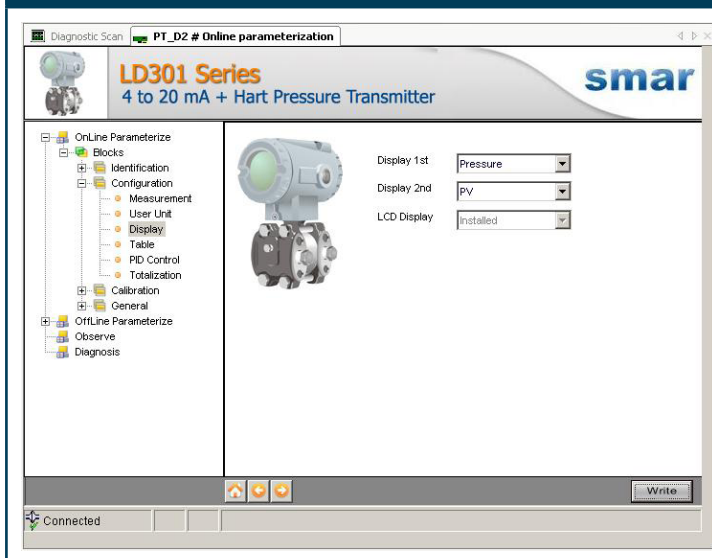
EU 0%: "0,00"

EU 100%: "2.7271833" (p/ D1)

EU 100%: "8.6241106" (p/ D2)

Figura 69. Configuração de um transmissor de pressão (cont.).

ITEM: "CONFIGURATION" > "DISPLAY"



Neste item, é possível habilitar a indicação de até duas variáveis distintas, para fins de visualização no *display*.

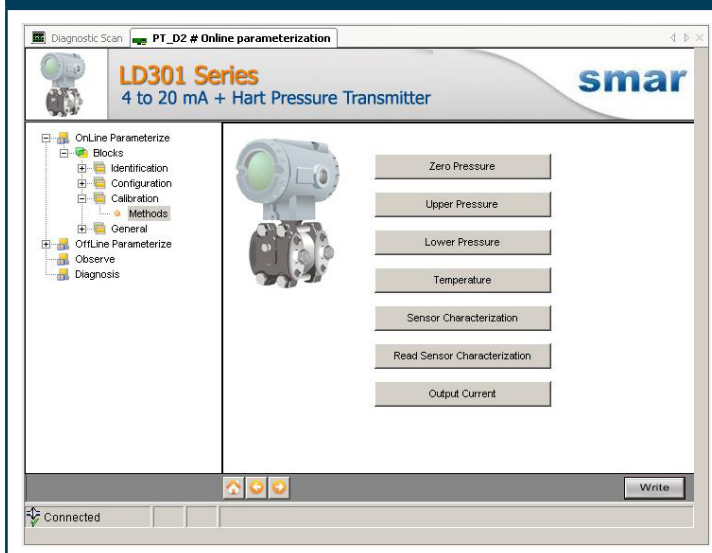
No parâmetro **Display 1st** determina-se a primeira variável a ser indicada no *display*.

No parâmetro **Display 2st** determina-se a segunda variável a ser indicada no *display*.

Após configurado conforme a figura ao lado, tem-se a indicação das duas variáveis de forma intercalada no *display*.

Figura 70. Configuração de um transmissor de pressão (cont.).

ITEM: "CALIBRATION" > "METHODS"



Neste item, é possível acessar os métodos para ajuste da curva de calibração do instrumento, nos parâmetros "**Zero Pressure**", "**Lower Pressure**", "**Upper Pressure**" e "**Sensor Characterization**".

O processo de ajuste é o processo utilizado para ajustar a medida em relação à pressão aplicada de acordo com o padrão de pressão do usuário. Normalmente, a discrepância mais comum encontrada nos transmissores é o deslocamento do "**Zero**" e pode-se corrigi-lo através do ajuste de "**Zero Pressure**" ou "**Lower Pressure**".

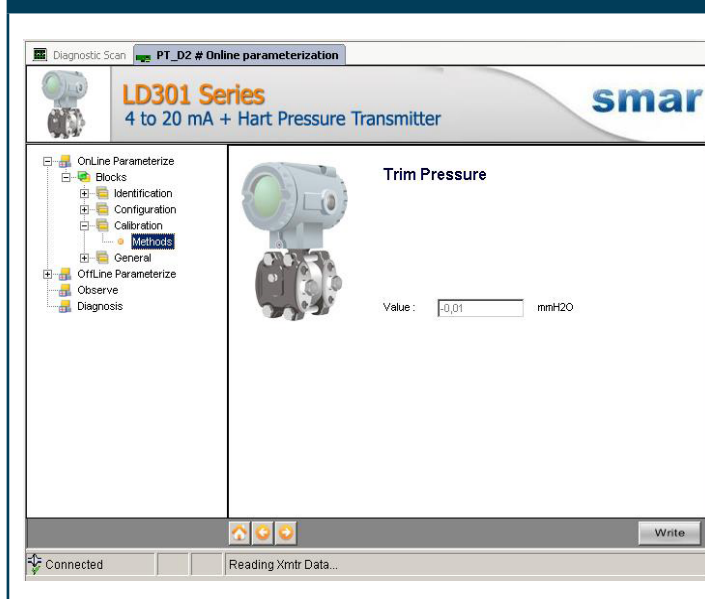
Figura 71. Calibração e ajuste de zero de um transmissor de pressão.

OBSERVAÇÃO:

O ajuste de pressão pelo método "**Zero Pressure**" só deve ser utilizado em transmissores de pressão anteriormente calibrados e que estejam com um deslocamento pequeno do "**Zero**", consequência de alterações das condições ambientais, algum choque mecânico leve etc.

Caso o transmissor de pressão esteja apresentando valores muito discrepantes mesmo tendo suas câmaras "**High**" e "**Low**" equalizadas, recomenda-se enviar o instrumento para manutenção.

ITEM: "CALIBRATION" > "METHODS" > "ZERO PRESSURE"



Assume-se que a pressão aplicada no transmissor de pressão é zero. A leitura zero deve ser apresentada quando as pressões de ambas as câmaras “High” e “Low” do transmissor de pressão diferencial estiverem equalizadas ou quando um transmissor manométrico é aberto para atmosfera, ou quando um transmissor de pressão absoluta é submetido ao vácuo. O usuário, portanto, não tem que entrar com nenhum valor. Deve apenas comparar o valor apresentado no campo “Value” com o valor apresentado no *display* do transmissor de pressão e, então, confirmar clicando em “Write” caso sejam iguais.

Figura 72. Calibração e ajuste de zero de um transmissor de pressão (cont.).

OBSERVAÇÃO:

Os métodos de ajuste de pressão “*Upper Trim*”, “*Lower Trim*” e “*Sensor Characterization*” devem ser realizados em laboratório, pois alteram as características da curva de calibração do transmissor de pressão e requerem um padrão de pressão com exatidão adequada ao sistema metrológico.

4.6.2.4 Configuração do conversor analógico digital

O arranjo para calibração dos medidores, além dos transdutores de pressão, possui um transmissor de temperatura que funciona como um conversor analógico digital, chamado neste documento de conversor A/D. Este conversor tem a função de transformar o sinal de vazão, da saída 4-20 mA do medidor a ser calibrado, em um sinal Hart. Neste caso, o sinal de 4-20 mA é capturado do *elemento secundário* do medidor em calibração.

O conversor A/D estará funcionando como um miliamperímetro de campo com comunicação Hart. A **Figura 73** ilustra a parte do “Field Terminals”, onde as ligações devem ser feitas:

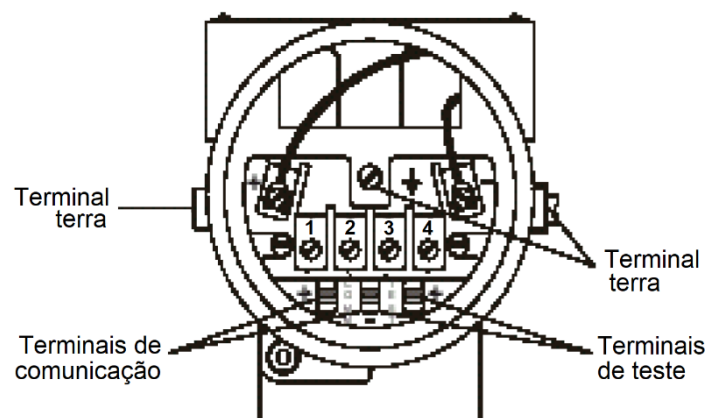


Figura 73. Vista frontal do campo de terminais do Conversor A/D.

A **Figura 74** ilustra o esquema de ligação para a entrada do sinal de “mV”, sendo que entre os terminais 2 e 3 deverá ser instalada uma resistência de $25\ \Omega \pm 1\%$ para a conversão do sinal analógico de 4-20 mA que provém do elemento secundário em um sinal analógico de 100-500 mV, adequando-se, então, às características de entrada do Conversor A/D.

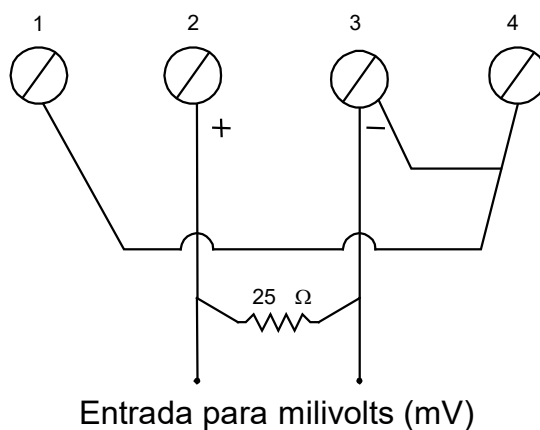


Figura 74. Esquema de ligação para entrada em milivolt.

ITEM: "IDENTIFICATION"

Diagnostic Scan TT-421 # Parameter

TT421
4 to 20 mA + Hart Temperature Transmitter

OnLine Parameterize
Blocks
Identification
Configuration
Calibration
Monitoring
Operation Counters

Manufacturer: Smar
Device Id: 1170
Model: TT421
Software rev: 18
Tag: TT_TELEM
Descriptor: CONV. A/D
Message: CORRENTE#HART
Sensor Type: mV (500)

Write

Connected

No item **"Identification"**, acessa-se as informações de fábrica dos instrumentos.

Parâmetros que devem ser configurados:

Tag Name: "TT_TELEM"

Description: "CONV. A/D"

Message: "Corrente/Hart"

OBSERVAÇÃO:

Nos exemplos do conversor A/D utiliza-se a DTM para o modelo TT421 fornecida pela Smar e não mais a DTM de "Generic HART".

Se for necessário alterar o "Address", seguir as instruções do tópico "Acessando os Devices"; "Passo 9" em diante.

Figura 75. Configuração de um transmissor de temperatura para medição de mV.

ITEM: "CONFIGURATION"

Diagnostic Scan TT-421 # Parameter

TT421
4 to 20 mA + Hart Temperature Transmitter

OnLine Parameterize
Blocks
Identification
Configuration
Sensor Type
Range Values
Pid
Calibration
Monitoring
Operation Counters

Measure Type: Single
Average Limit: 50227569580078125,00
Burnout: High
PV Unit: mV

Write

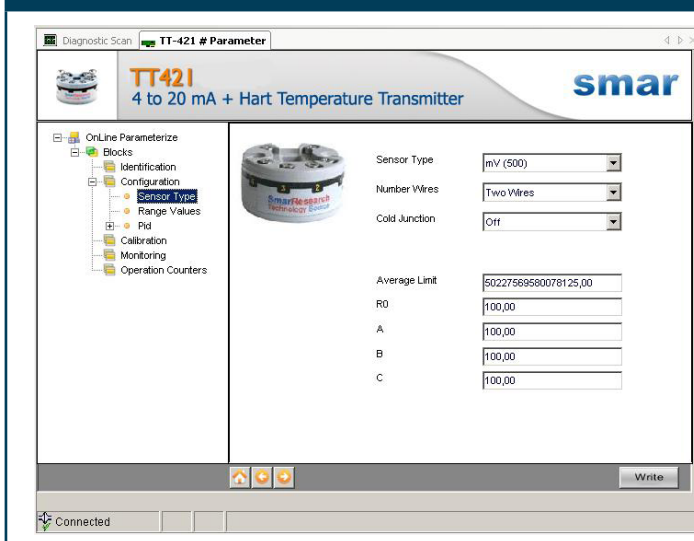
Connected

Parâmetros que devem ser configurados:

PV Unit: "Unidade da Grandeza Física"

Figura 76. Configuração de um transmissor de temperatura para medição de mV (cont.).

ITEM: "CONFIGURATION" > "SENSOR TYPE"



Neste item adequa-se o instrumento à sua utilização, conforme designado no item "Range Values".

Parâmetros que devem ser configurados:

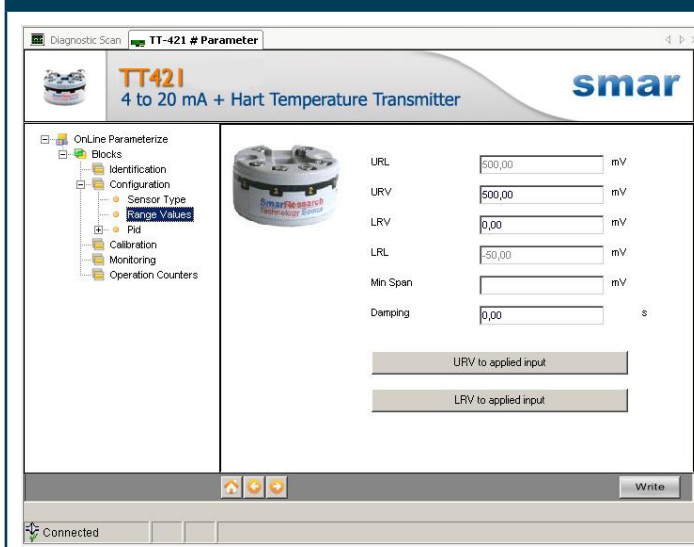
Sensor Type: "Tipo de sensor"

Number Wires: "Tipo de ligação"

Cold Junction: "Off"

Figura 77. Configuração de um transmissor de temperatura para medição de mV (cont.).

ITEM: "CONFIGURATION" > "RANGE VALUES"



Neste item configuram-se os parâmetros relacionados à variável a ser medida pelo instrumento, tais como a faixa efetiva de trabalho.

Parâmetros que devem ser configurados:

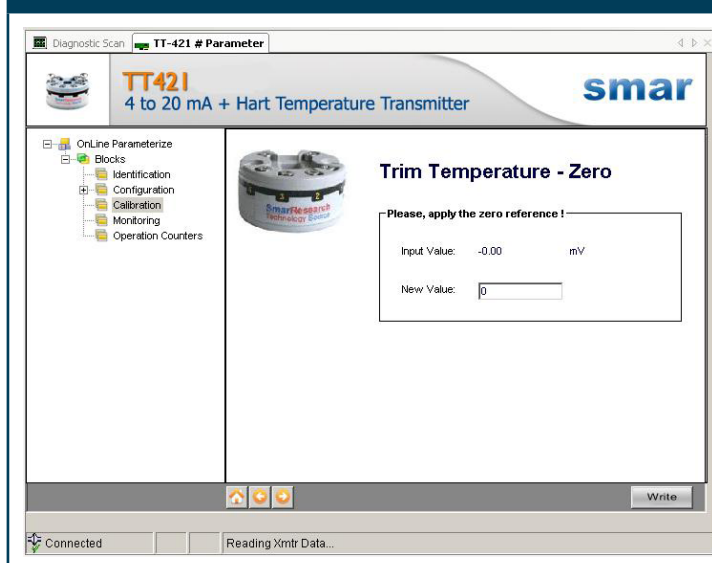
URV: "Valor de Fim de Faixa"

LRV: "Valor de Início de Faixa"

Damping: "0,00"

Figura 78. Configuração de um transmissor de temperatura para medição de mV (cont.).

ITEM: "CALIBRATION"



Neste item, é possível o acesso ao ajuste da curva de calibração do instrumento. Ao clicar no método "Zero" será ajustado o valor de Zero referente à indicação do início da faixa efetiva de trabalho do instrumento, por meio da introdução do valor no campo "New Value" e confirmação do valor ao clicar no botão "Write".

Figura 79. Calibração e ajuste de zero de um transmissor de temperatura para medição de mV.

4.7 Calibração da instrumentação

De modo similar à calibração dos macromedidores de vazão, descrita no **Item 2** deste manual, a calibração de um transdutor de pressão diferencial é realizada por meio da comparação dos valores medidos pelo instrumento com os valores medidos por um padrão de pressão.

A **Figura 80** apresenta um exemplo de planilha com os dados de calibração de um transdutor de pressão e os seus principais resultados que são a equação de calibração, a incerteza de medida e o fator de abrangência associados, que são apresentados no último quadro da planilha.

PLANILHA DE CALIBRAÇÃO DE TRANSDUTOR DE PRESSÃO

1. IDENTIFICAÇÃO DO TRANSDUTOR

1.1 Identificação (TAG) PT-71
 Fabricante Smar
 Tipo de transdutor Capacitivo Diferencial de Pressão
 Modelo LD 301
 N° de série 148599
 Faixas de operação 0 - 500 mmH₂O
 0 - 4,90 kPa

1.2 Instrumento de leitura do sinal
 Identificação (TAG) SOFTWARE CONF

1.3 Fonte de tensão
 Identificação (TAG) BATERIAS Tensão elétrica 25 V

1.4 Patm 700,0 mmHg Temp. ambiente 18,0 °C

2. PADRÃO DE PRESSÃO

Identificação (TAG) PC-11 Incerteza 0,03
 Fator de abrangência 2,0

3. DADOS DA CALIBRAÇÃO

% pres. máxima	Pressão nominal [mmH ₂ O]	Subida	Descida	Média Pressão de referência	Indicação [mmH ₂ O]			Curva de calibração	
		Pressão de referência [mmH ₂ O]	Pressão de referência [mmH ₂ O]		indicação 1	indicação 2	média	estimativa	erro
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,1	-0,1
20	100,00	100,00	100,00	100,00	99,65	99,98	99,81	100,0	0,0
40	200,00	200,00	200,00	200,00	199,09	199,75	199,42	199,9	-0,1
60	300,00	300,00	300,00	300,00	299,32	299,44	299,38	300,2	0,2
80	400,00	400,00	400,00	400,00	398,95	399,07	399,01	400,1	0,1
100	500,00	500,00	500,00	500,00	498,39	498,39	498,39	499,8	-0,2

4.1 EQUAÇÃO DO TRANSDUTOR

Pressão = (P_{ind} - 0,085820) * 1,003012 [mm H₂O]
 Incerteza dos resultados = 0,25 [mm H₂O] (0,05 % do fundo de escala)

4.2 ESTIMATIVA DA INCERTEZA DA CALIBRAÇÃO

Grandeza	Estimativa	Incerteza padronizada	Distribuição	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza	Graus de liberdade
f(V _{ind})	f(V _{ind})		-	1	0,00	-
Erro do ajuste de curva	0	0,11	normal	1	0,11	11
calibração do padrão de pressão (=mmH ₂ O)	0	0,01	normal	1	0,01	infinito
Pressão(V _{ind})	f(V _{ind})				0,11	11
k =	2,2					
Incerteza expandida =	0,25					

Transdutor de Pressão		PT- 71
		N° de série 148599
Pressão = (P _{ind} - 0,085820) * 1,00301 [mmH ₂ O]		
Calibrado em	Frequência de Calibração: 6 meses	
28.10.2014		
incerteza dos resultados =		0,25 [mmH ₂ O] k = 2,2
Responsável: RODRIGO SILVA NASCIMENTO		
Span: 500 mmH ₂ O		
4,90 kPa		

Figura 80. Planilha de calibração de um transdutor de pressão.

Conforme a definição de equação de calibração apresentada na área 9-*Equação de calibração* da **Planilha Dados_Iniciais**:

$$DP = (DP_{ind} + b) \times a \quad (8)$$

onde:

DP : valor da pressão, corrigida com base nos resultados da calibração, em mmca e

DP_{ind} : valor da pressão indicada pelo transdutor de pressão, em mmca

Para este exemplo, são apresentados:

Coeficiente angular da reta de calibração: $a = 1,00301$ ⁽¹⁾

Coeficiente linear da reta de calibração: $b = -0,085820$ ⁽²⁾

Incerteza expandida: $U = 0,25 \text{ mmca}$ ⁽³⁾

Fator de abrangência da incerteza $U:k = 2,2$ ⁽⁴⁾

Notas:

⁽¹⁾ é esperado que o valor de a esteja próximo da unidade;

⁽²⁾ é esperado que o valor de b esteja próximo de zero (positivo ou negativo);

⁽³⁾ é esperado que o valor de U seja baixo quando comparado ao *span* máximo do transdutor;

⁽⁴⁾ é esperado que o valor de k seja próximo de 2, para um nível da confiança de 95 %.

4.8 Integração da instrumentação via software

O programa de aquisição de dados PITOT, desenvolvido pelo IPT, é uma ferramenta de trabalho para pitometria em campo que proporciona um sistema automático e portátil de aquisição de sinais digitais por meio do protocolo *Hart*, eliminando a necessidade de softwares supervisórios proprietários (por exemplo: FIX, AIMAX, LAbView, etc.).

Dentre as principais características deste programa, podem ser citados:

- comunicação por meio do protocolo *Hart*;
- comunicação digital proporcionando maior confiabilidade dos dados;
- comunicação sem fio via protocolo *Bluetooth* (desde que seja utilizada uma pinça apropriada);
- possibilidade de utilização de até 16 instrumentos (*devices*) na malha;
- geração de relatórios completos sobre os dados adquiridos durante as medições;
- transferência de dados entre aplicativos via DDE;
- interface simples para o usuário.

A **Figura 81** apresenta a tela inicial do programa PITOT, versão 3.2.



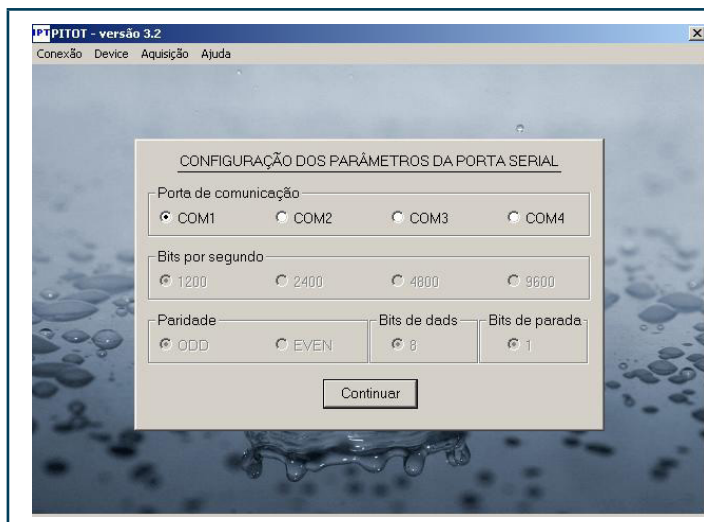
Figura 81. Tela inicial de apresentação do programa PITOT, versão 3.2.

Depois que cada um dos instrumentos do sistema de medição tenham sido configurados, estes deverão ser montados conforme o arranjo experimental descrito anteriormente.

A seguir, é apresentado um tutorial contendo as funcionalidades e características do programa PITOT, versão 3.2.

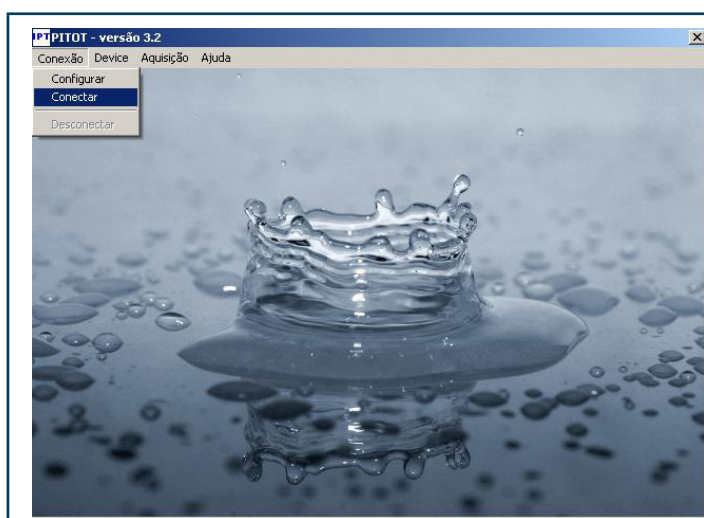
- **Tutorial do programa PITOT, versão 3.2**

	<p>Inicialmente, clicar no menu “Conexão” e selecionar a opção “Configurar”.</p>
--	--

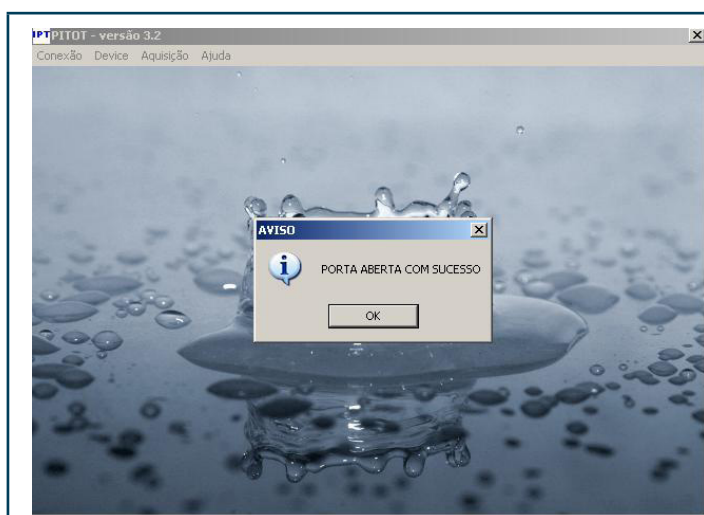


A janela aberta possibilita a alteração da porta de comunicação serial, onde o padrão do programa é a porta COM1.

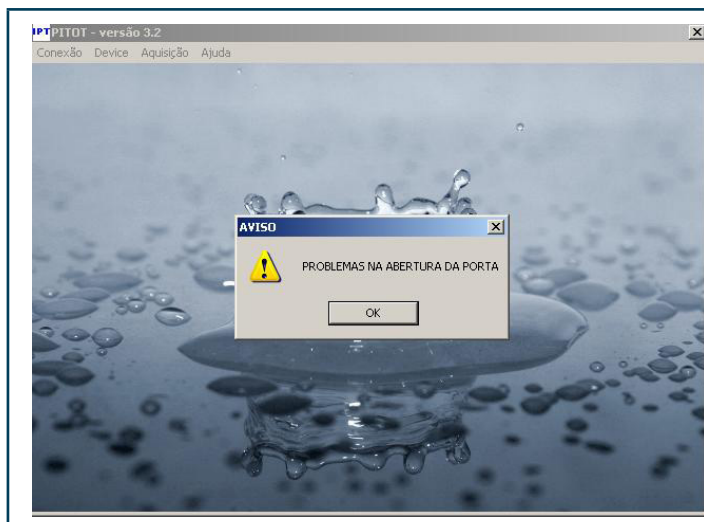
Não é possível a alteração dos valores de paridade (ímpar), taxa de transmissão (1200), bits de dados (8) e bits de parada (1).



Ainda no menu "Conexão", selecionar a opção "Conectar".



Deverá aparecer uma mensagem confirmando que a conexão com a porta de comunicação foi estabelecida.



Caso contrário, aparecerá uma mensagem de alerta informando que a conexão com a porta de comunicação não foi estabelecida.

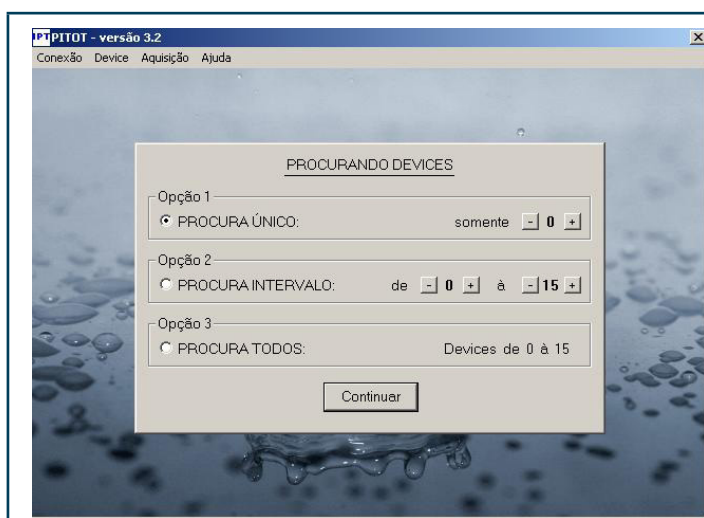
Principais motivos da falha:

- a) Porta incorreta;
- b) Porta em uso;
- c) Problemas técnicos.

Analisar e sanar o problema.

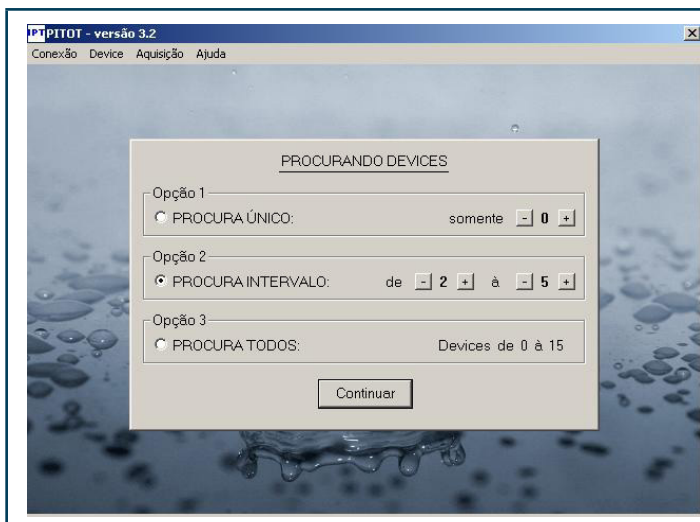


Após realizada a conexão, selecionar o menu "Device" e, depois, a opção "Procurar".



Para procurar um único *device* conectado à malha Hart, selecionar a "Opção 1" e clicar no botão "Continuar".

A alteração do valor de procura se dá por meio dos botões "+" e "-" do campo "Opção 1".



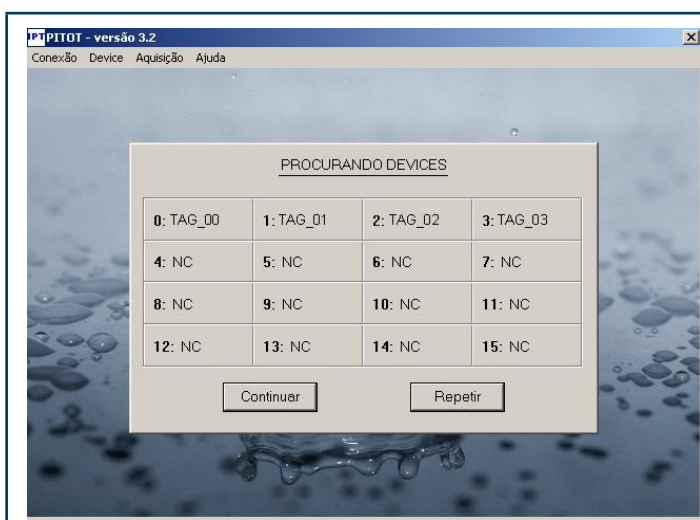
Por sua vez, para procurar uma faixa de *devices* conectados à malha Hart, selecionar a “Opção 2” e clicar no botão “Continuar”.

A alteração dos valores de procura se dá por meio dos botões “+” e “-” do campo “Opção 2”.



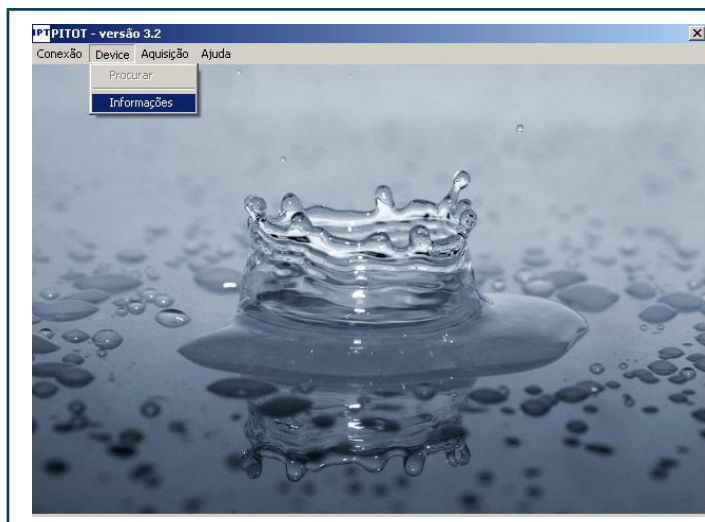
Finalmente, para procurar todos os *devices* conectados à malha Hart, selecionar a “Opção 3” e clicar no botão “Continuar”.

Não é possível a alteração dos valores de procura do campo “Opção 3”.

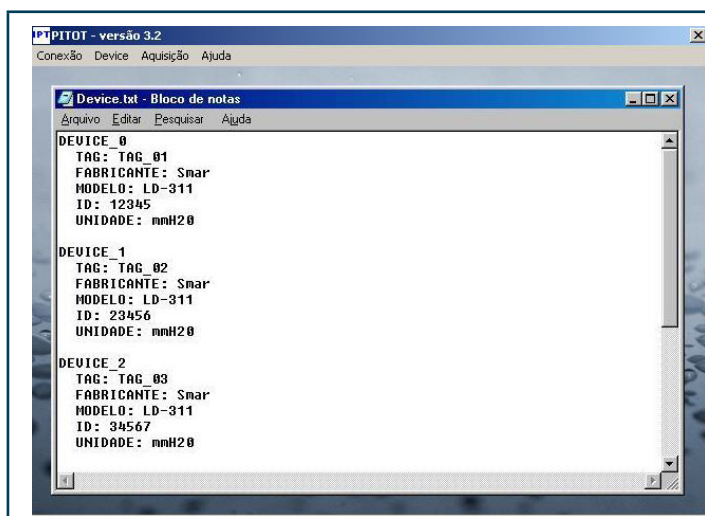


Durante a procura dos *devices* e ao lado do número aparecerá:

- TAG correspondente, para aqueles que estão conectados, ou,
- NC, para aqueles que não estão conectados.

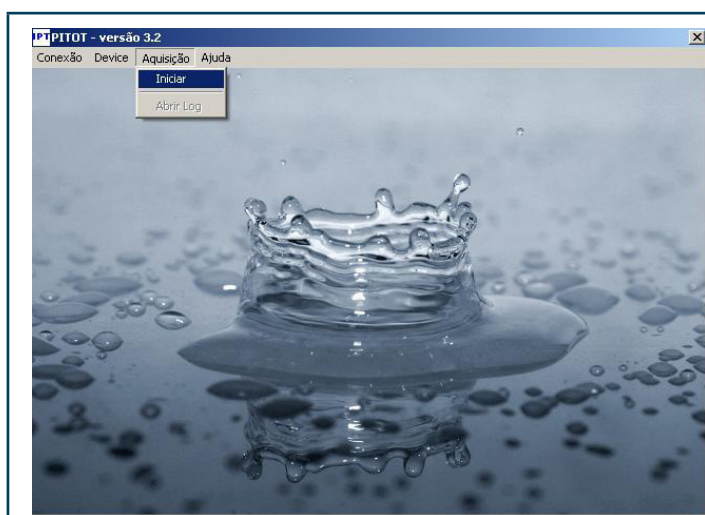


Para obter informações sobre os *devices* encontrados, selecionar o menu “Device” e a opção “Informações”.

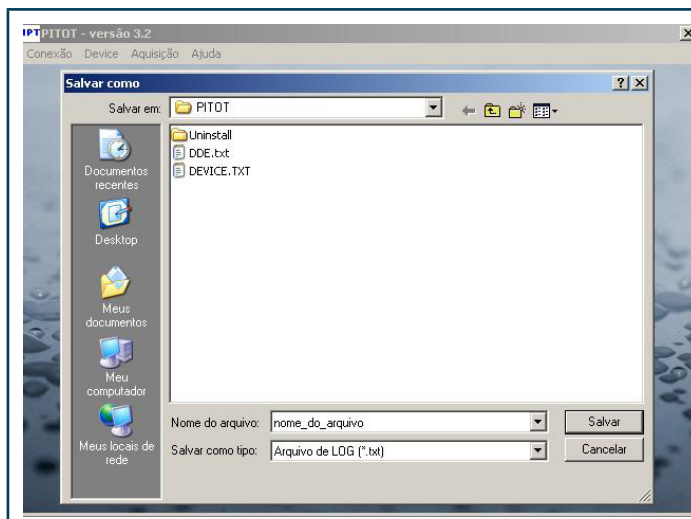


As informações dos *devices* encontrados estão em um arquivo chamado DEVICE.TXT, que contém as seguintes informações:

- TAG;
- Fabricante;
- Modelo;
- ID;
- Unidade da variável primária.

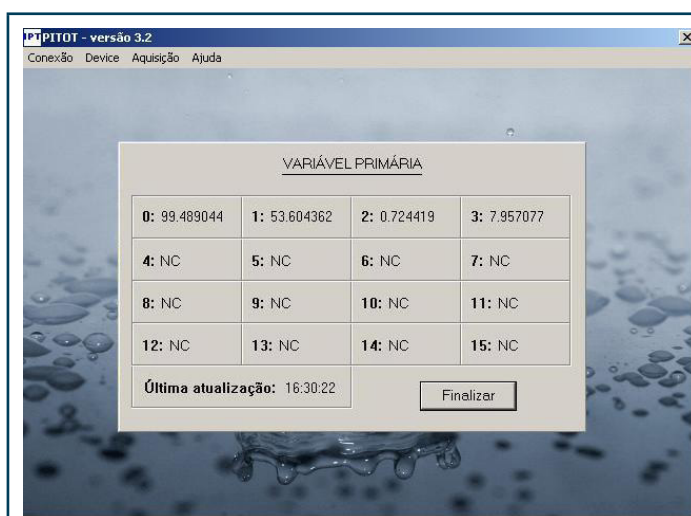


Para iniciar a aquisição de dados dos *devices* encontrados selecionar o menu “Aquisição” e a opção “Iniciar”.



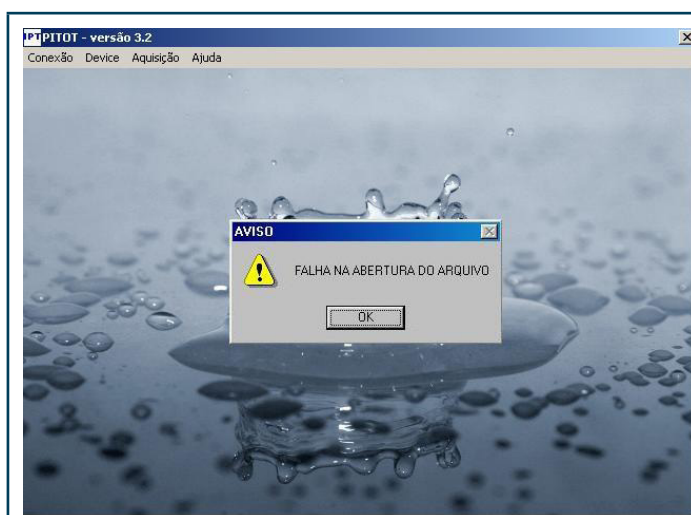
Deve-se alterar o nome do arquivo em que os dados de *log* serão salvos.

Não é necessária a inclusão da extensão, pois todos os arquivos serão gerados com a extensão TXT.



Ao lado do número do *device* será apresentado o valor da variável primária, ou NC (para *devices* não conectados).

Na parte inferior da janela é apresentado o horário da última varredura da malha.



Caso não seja possível a abertura do arquivo, será apresentada uma mensagem de alerta.

Principais motivos da falha:

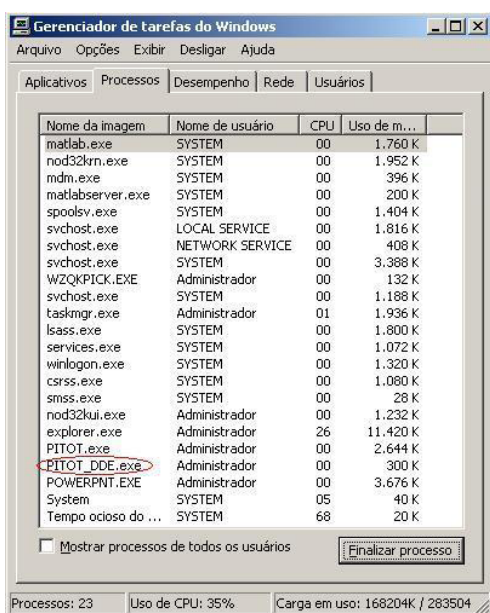
- a) Arquivo em uso;
- b) Nome inválido;
- c) Selecionada a opção CANCELAR.

Analisar e sanar o problema.

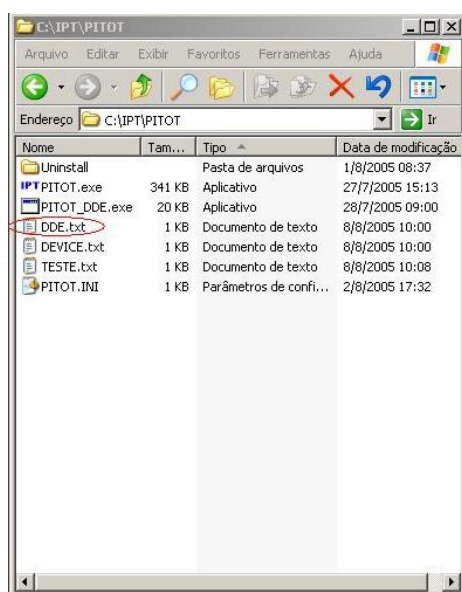
- Interface de comunicação entre o programa PITOT e o software Microsoft Excel®

A interface de comunicação entre o programa PITOT e o software Microsoft Excel® é feita por meio do aplicativo PITOT_DDE (Dynamic Data Exchange) que apresenta as seguintes características:

- Transferência de dados entre aplicativos;
- Pitot (server) → Excel (client)
- Transparente para o usuário;
- Alta velocidade de transmissão;
- Transmissão ocorre somente quando há a varredura completa da malha e apenas dos *devices* conectados.

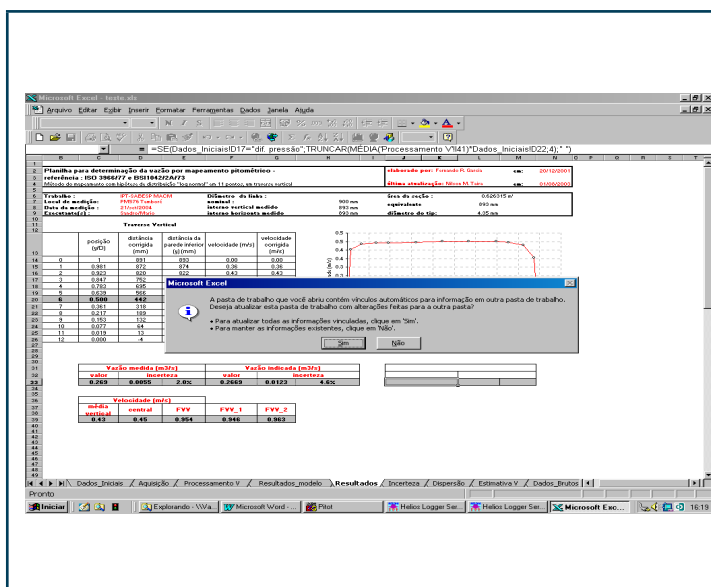


O aplicativo PITOT_DDE é transparente ao usuário, tanto que não aparece na barra de tarefas e somente é possível visualiza-lo no gerenciador de tarefas do Windows.



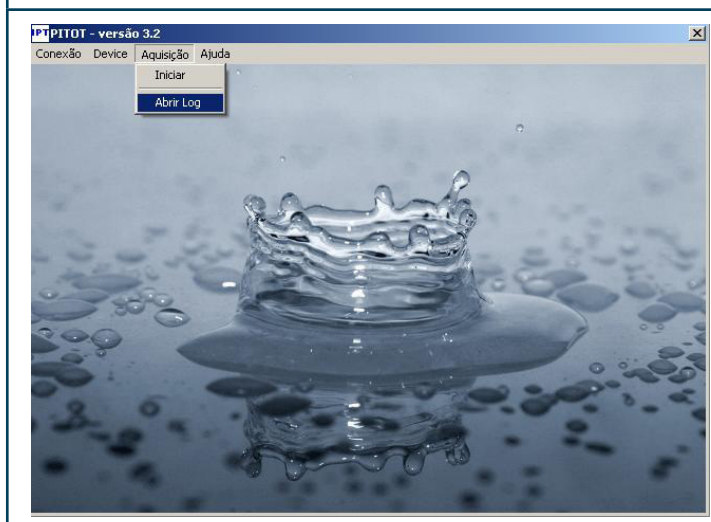
Para a realização da comunicação, o aplicativo PITOT_DDE utiliza um arquivo chamado DDE.TXT.

Este arquivo não deve ser apagado, pois causaria perda na transferência de dados entre os dois aplicativos.

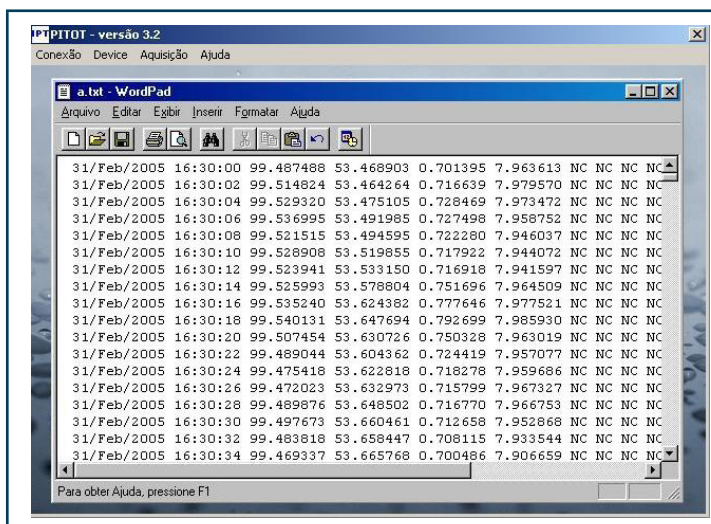


Abertura da planilha:

Abrir a planilha no Excel®, clicar no botão **SIM** para permitir a atualização dos vínculos automáticos.

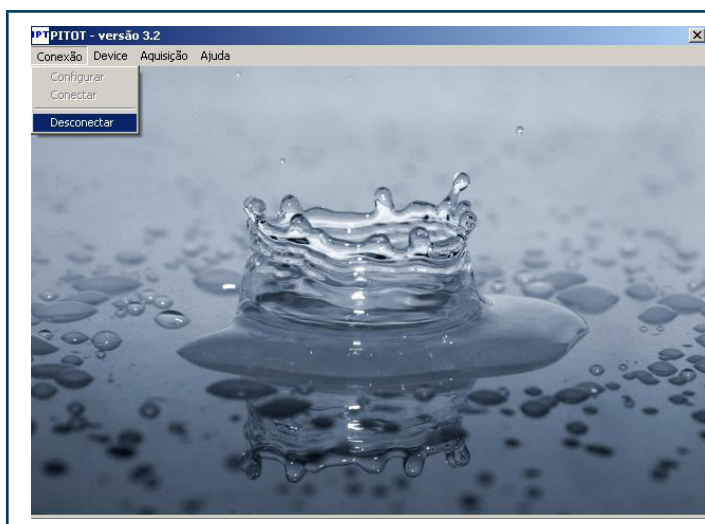


Para abrir o registro de dados adquiridos na medição, selecionar o menu "Aquisição" e a opção "Abrir Log".

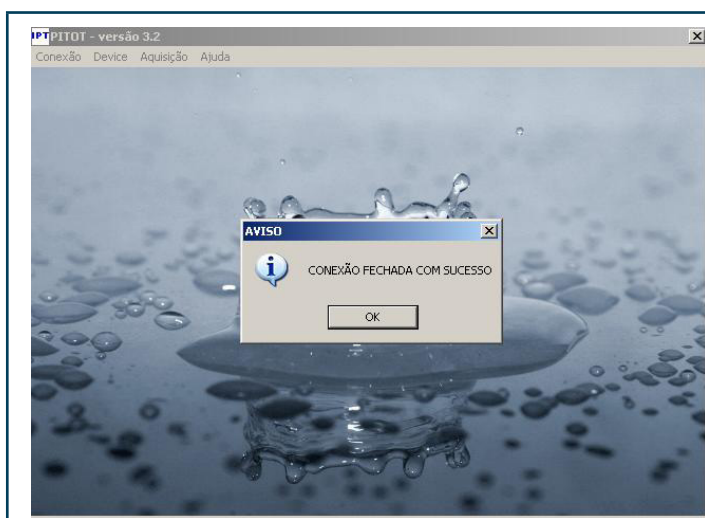


Os dados poderão ser visualizados por meio do arquivo onde foram salvos.

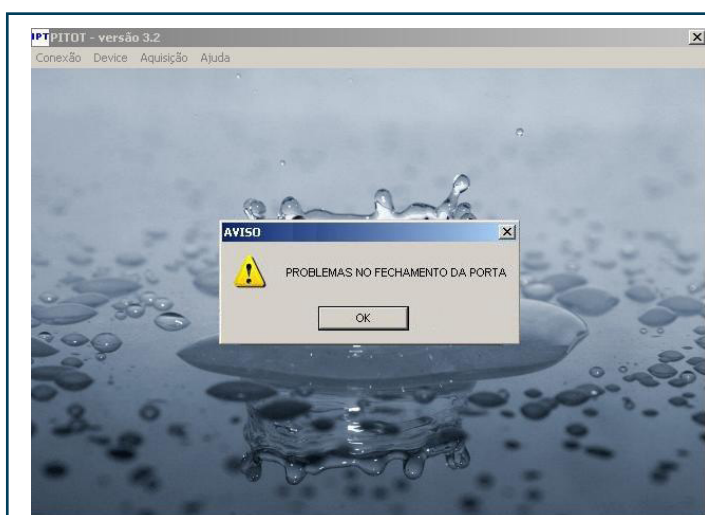
Os dados serão apresentados da seguinte forma: na primeira coluna é descrita a data, na segunda o horário, e da terceira à décima oitava, são apresentados os valores "aquisitados" dos 16 devices.



Para desconectar, basta selecionar o menu "Conexão" e a opção "Desconectar".



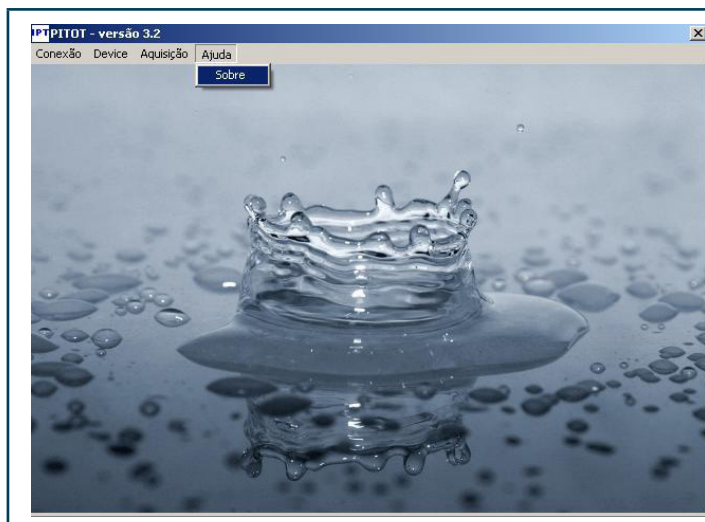
Mensagem informativa de que a conexão com a porta de comunicação foi encerrada.



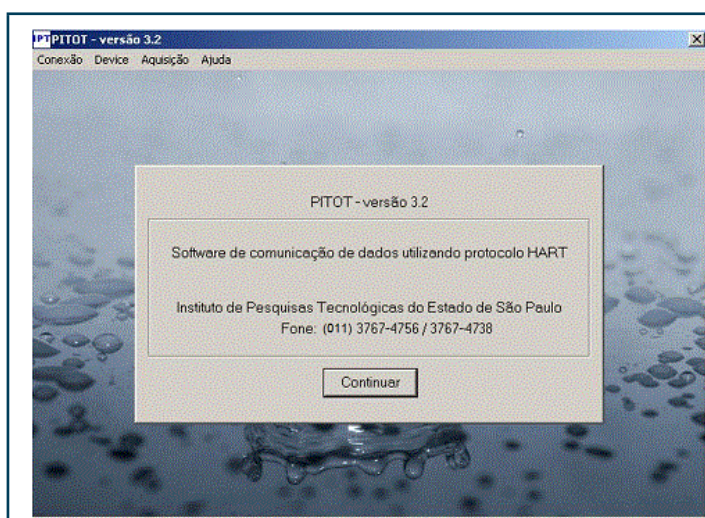
Mensagem de alerta informando que a conexão com a porta de comunicação serial não foi fechada.

Principais motivos da falha:

- a) Porta em uso;
- b) Problemas técnicos.



Para obter informações sobre o programa, basta selecionar o menu “Ajuda” e a opção “Sobre”.



Apresenta os créditos do programa PITOT e sua versão.

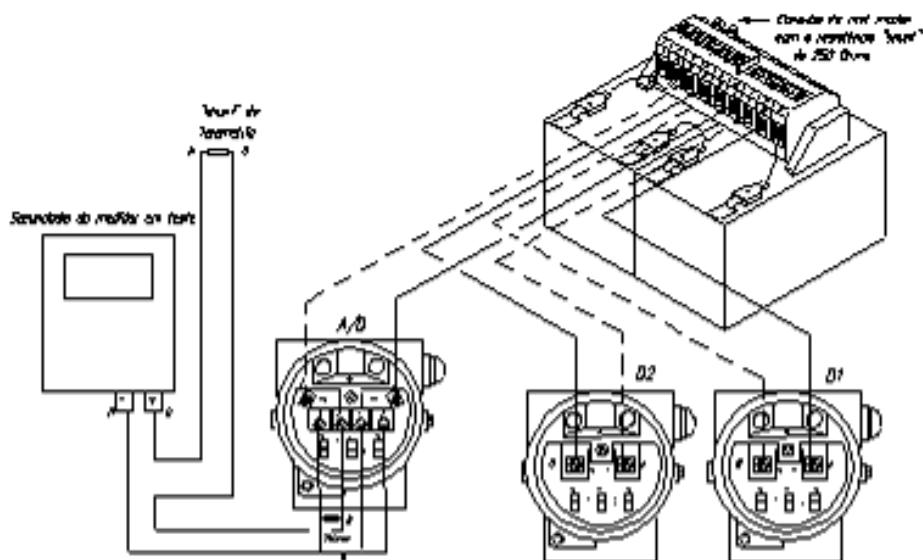
Em caso de falhas, informar o IPT pelos telefones citados (ver figura ao lado) para eventuais necessidades de ajustes ou correções do programa PITOT.

Informações relevantes:

- Não é possível fechar o programa com menus abertos;
- Não é possível fazer cópias do programa;
- Planilhas e logs devem ficar em diretórios diferentes do programa;
- A transferência de dados via DDE só é possível com mais de um *device* na malha;
- O arquivo de *log* nunca é sobrescrito e, sim, acrescido de novos dados;
- O arquivo DEVICE.TXT é sobrescrito após uma nova varredura da malha;
- Nunca apagar o arquivo PITOT.INI, pois este contém a chave de utilização do programa PITOT.

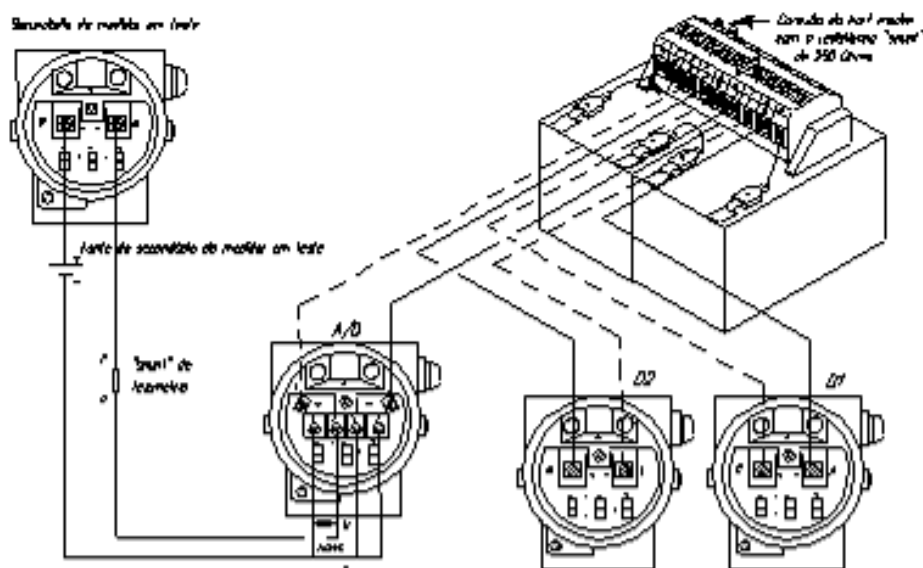
4.9 Arranjos físicos elétricos da instrumentação

A **Figura 82** e **Figura 83** apresentam os arranjos físicos elétricos da instrumentação para calibração de medidores de vazão dos tipos eletromagnético e por pressão diferencial (tubo de Venturi, tubo de Dall etc.).



Fonte: IPT

Figura 82. Arranjo físico elétrico da instrumentação para calibração de medidores de vazão do tipo eletromagnético.



Fonte: IPT

Figura 83. Arranjo físico elétrico da instrumentação para calibração de medidores de vazão do tipo pressão diferencial (tubo de Venturi, tubo de Dall etc.).

4.10 Medição do diâmetro interno da tubulação

Dentre as várias informações e dados que são utilizados nos levantamentos pitométricos para a medição da vazão de água em um conduto, encontra-se o diâmetro interno efetivo da tubulação na seção transversal de medição. Mesmo uma tubulação nova não apresenta o diâmetro perfeitamente igual ao valor nominal e no caso de tubulações mais antigas, é comum existir incrustações nas paredes do conduto que podem acabar reduzindo o seu diâmetro interno. Torna-se necessário, portanto, a determinação do diâmetro interno efetivo do conduto na seção onde está sendo realizada a medição de vazão por pitometria.

Além disso, ao se instalar um *tap* de pitometria, não raramente este se projeta em certo grau para o interior da tubulação provocando uma redução na área da seção transversal de escoamento. Nesses casos, é necessária a determinação desta projeção para se efetuar as correções necessárias na área interna da tubulação e no diâmetro interno do conduto.

A determinação do diâmetro interno da tubulação em campo não é tarefa simples uma vez que, via de regra, o conduto estará preenchido com água, sob pressão e acessível apenas através do(s) *tap*(s) instalado(s) na parede da tubulação.

Para a determinação do diâmetro interno efetivo do conduto e da projeção do *tap* é utilizado um equipamento denominado *cálibre* ou *galgador*, dispositivo mecânico, acessório do tubo de Pitot do tipo Cole, como ilustrado na **Figura 84**. O *cálibre* ou *galgador* é um instrumento semelhante ao tubo de Pitot, tanto em aparência, como em procedimentos de instalação. A diferença fundamental é que este equipamento possui no interior da haste um só tubo metálico e na sua extremidade o gancho de calibração.

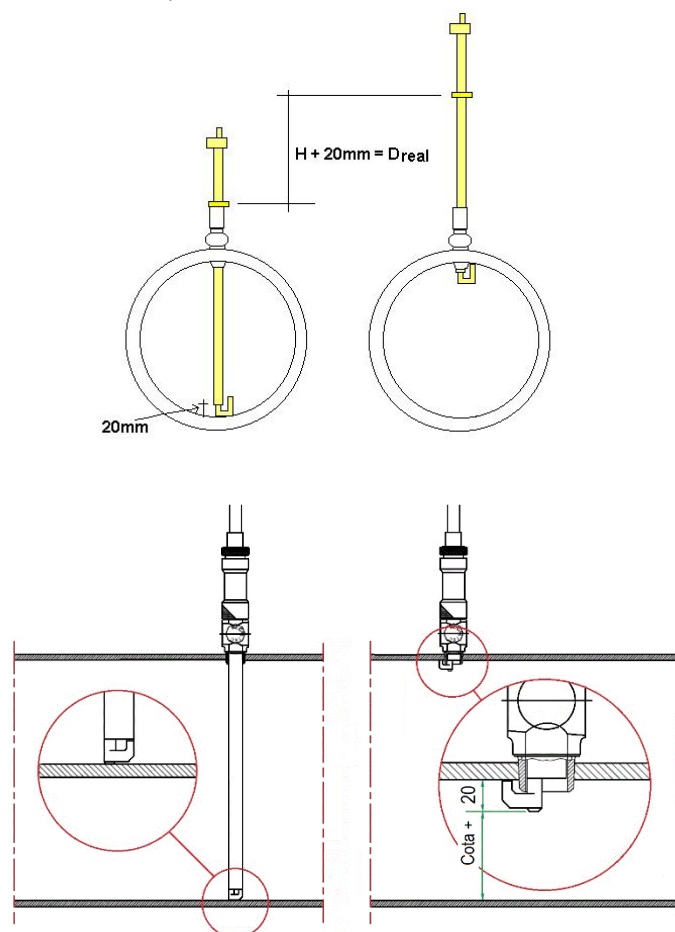


Figura 84. Calibre ou galgador de um tubo de Pitot do tipo Cole.

Fisicamente, o calibrador consiste de uma haste de latão que desliza através de uma caixa de gaxeta. A extremidade inferior é em forma de gancho rotativo, e na extremidade superior encontra-se adaptado um dispositivo apropriado à operação do gancho e medição dos deslocamentos.

Na haste encontra-se também um cursor móvel utilizado para indicador de posição. Para se fixar o calibrador na válvula previamente colocada na seção de medição, atarraxa-se a caixa de gaxeta no *tap* colocando-se entre os dois uma junta de couro ou de Neoprene em forma de anel. Com a haste fixada abre-se a válvula introduzindo-a até que a extremidade inferior, toque suavemente o tubo na sua parte interna inferior. Nesta posição prende-se o cursor à haste, com aquele encostado na caixa de gaxeta deste. Suspende-se a haste cerca de 10 mm e gira-se de 180 graus, através da guia de posicionamento. Suspende-se a haste até o gancho tocar a parte superior do tubo.

Note-se que para a determinação do diâmetro real da tubulação devem ser acrescentados ao valor medido os 20 mm referentes ao comprimento do gancho. A **Figura 85**, a seguir, ilustra o exposto:

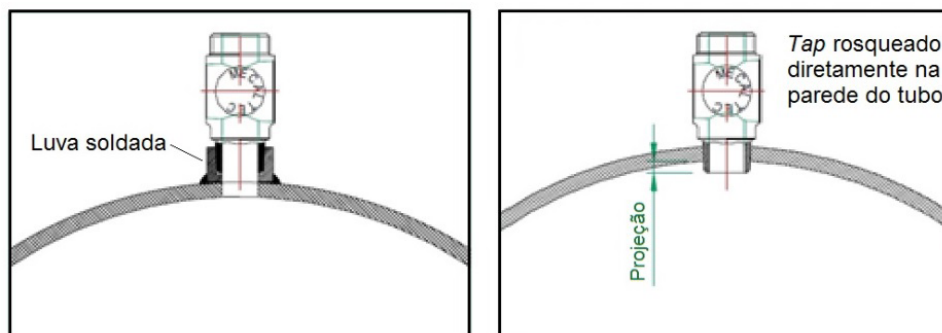


Fonte: IPT

Figura 85. Uso do calibre ou galgador para medição do diâmetro interno do tubo.

A medição do diâmetro interno da tubulação deve ser realizada na vertical, horizontal ou em ambas; se existirem dois *taps*. Outra disposição dos *taps* pode ser a de 45° em relação ao eixo vertical.

Deve-se atentar para o caso em que os *taps* são rosqueados diretamente na parede do tubo, notadamente em linhas de ferro fundido. Nesse caso, em função do diâmetro interno, a calculada pode não ser alcançada por restrição física e, portanto, deve ser estabelecida por extrapolação. O valor real medido deve ser lançado no respectivo campo da planilha de calibração. A **Figura 86** ilustra este problema que é comumente encontrado em campo.








Fonte: IPT

Figura 86. Instalações típicas de *tap*: à esquerda, em tubulação de aço e, à direita, de ferro fundido.

Conforme se pode observar nas figuras anteriores, o *tap* deve ser rosqueado em uma luva de aço soldada diretamente na geratriz (tubulação de aço) ou ser instalado rosqueado diretamente na adutora (tubulação de ferro fundido).

Onde a estação pitométrica possuir dois *taps* posicionados a 90° entre si, é fortemente recomendável que as medições dos diâmetros internos e das projeções dos *taps* sejam efetuadas nos dois diâmetros de varredura disponíveis. O objetivo é obter uma avaliação mais correta do diâmetro interno efetivo do conduto e das projeções dos *taps* uma vez que nem sempre as tubulações são perfeitamente cilíndricas, não possuem os mesmos graus de incrustação nas paredes e nem sempre os eixos dos furos executados para a instalação dos *taps* cruzam perpendicularmente o eixo do conduto.

As fotografias a seguir foram retiradas do baseadas no documento *Guia Prático de Ensaio Pitométricos* [12], de autoria de Márcio Frangipani, elaborado em 2005 no âmbito do Programa de Modernização do Setor Saneamento – PMSS, da Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Ministério das Cidades, Governo Federal. Elas ilustram os procedimentos passo a passo para a utilização do calibre.

PASSO 1	PASSO 2	PASSO 3
		
Rosquear o corpo do cálibre no tap.	Abrir o tap.	Inserir o cálibre no conduto até o gancho encostar no fundo.
PASSO 4	PASSO 5	PASSO 6
		
Ajustar o índice, apertando o parafuso de fixação.	Suspender parcialmente a haste e abrir o gancho.	Suspender totalmente a haste até o gancho encostar na tubulação.

PASSO 7	PASSO 8	PASSO 9
		
Medir a distância na haste desde o corpo do galgador até o parafuso de referência. Esta medida é a distância de parede a parede (diâmetro interno efetivo do conduto).	Introduzir a haste e fechar parcialmente o gancho (ângulo de 45°).	Suspender totalmente a haste até sentir que o gancho encostou na borda do <i>tap</i> . Medir a distância na haste desde o corpo do galgador até o parafuso de referência. Esta medida é a distância da parede ao <i>tap</i> .

IMPORTANTE: Considerando que o diâmetro do conduto é um parâmetro importante no cálculo da vazão, sempre que possível, este procedimento deve ser repetido pelo menos mais duas vezes para obter três medidas de cada diâmetro e utilizar a média dessas medidas como valor do diâmetro.

4.11 Distância do centro do *tip* à extremidade inferior do tubo de Pitot

A distância do centro do *tip* a extremidade inferior do tubo de Pitot é definida como parâmetro *L*, cujo valor deverá ser medido para cada tubo de Pitot.

As **Figuras 87 e 88** exemplificam estas distâncias para duas concepções de tubos de Pitot, com e sem pino de segurança.

	
<p>Fonte: IPT</p> <p>Figura 87. Distância L para tubo de Pitot com pino de segurança.</p>	<p>Fonte: IPT</p> <p>Figura 88. Distância L para tubo de Pitot sem pino de segurança.</p>

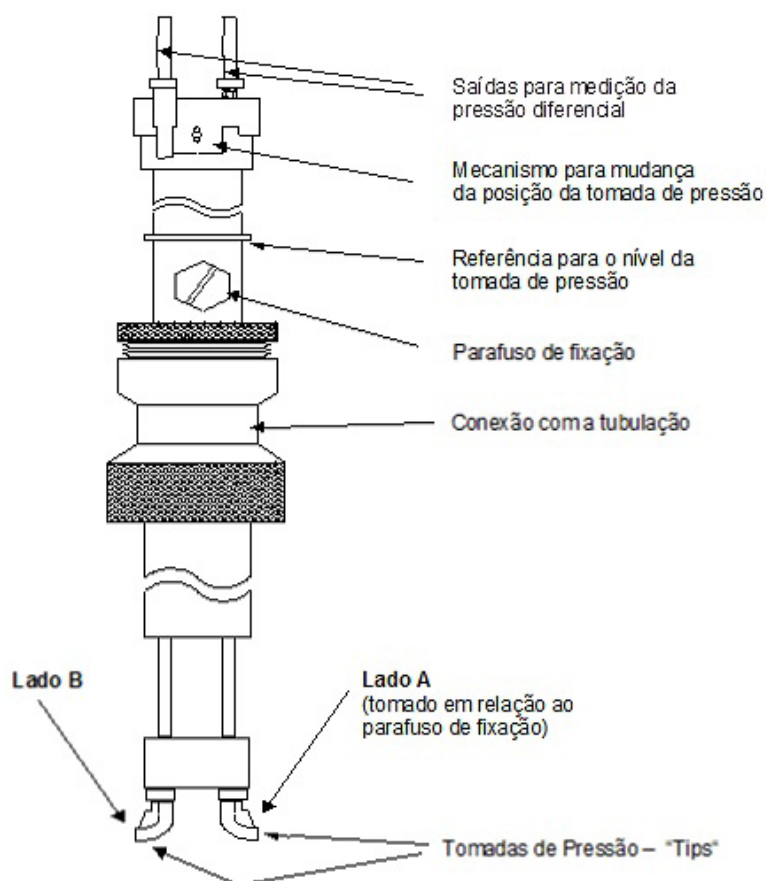
Vê-se que para tubos de Pitot sem pino de segurança a distância L é igual ao raio externo do *tip*.

4.12 Convenção sobre o lado do tubo de Pitot do tipo Cole

A calibração de um tubo de Pitot do tipo Cole se caracteriza por apresentar resultados que variam conforme a orientação das tomadas de pressão em relação ao escoamento; ou seja, conforme o *tip* que está de frente para o escoamento de água.

Apesar dos dois *tips* serem muito parecidos entre si, pequenas diferenças de forma, de dimensão e até de rugosidade superficial podem causar alterações no valor do coeficiente de calibração **C_d** da sonda que deve ser inserido na área **16-Tubo de Pitot** da **Planilha Aquisição**.

O certificado de calibração do tubo de Pitot convencionou que o tubo de Pitot do tipo Cole está na posição Lado A ou Lado B, quando o *tip* do Lado A ou do Lado B está de frente para o escoamento, conforme mostrado na **Figura 89**. Essa informação deve constar claramente do certificado de calibração fornecido pelo laboratório que realizou a calibração da sonda.



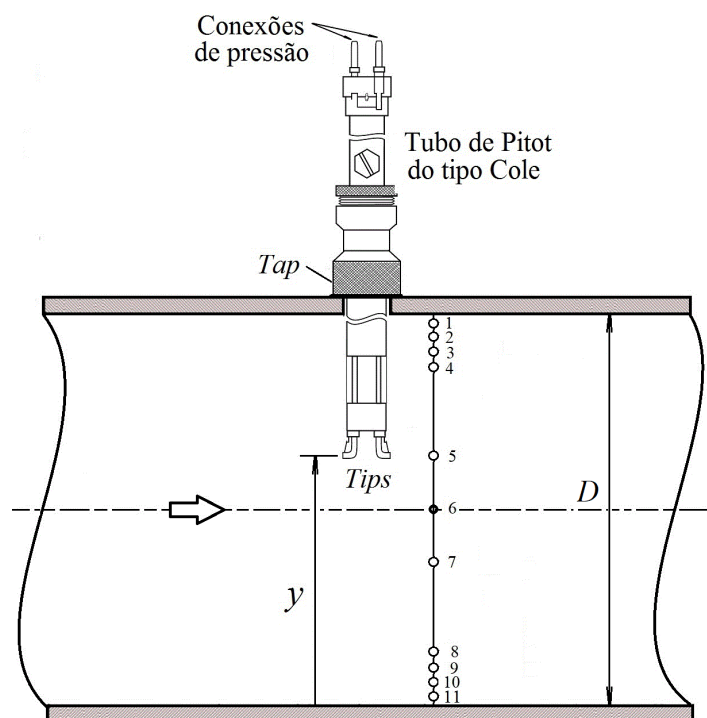
Fonte: IPT

Figura 89. Convenção para posição dos lados do tubo de Pitot do tipo Cole.

4.13 Cálculo das posições do ponto extremo do tubo de Pitot

A norma NBR ISO 3966 [11] define, com base no método *Log-linear* de mapeamento do perfil de velocidades do escoamento, a localização dos pontos de medição correspondentes aos valores de distância relativa y/D do centro do *tip* do tubo de Pitot Cole até a parede do fundo do conduto.

A **Figura 90** e a **Tabela 4** mostram a localização específica dos pontos no caso do levantamento do perfil de velocidades do escoamento por meio de 11 pontos do diâmetro.



Fonte: IPT

Figura 90. Localização dos pontos de medição da velocidade do escoamento com o tubo de Pitot do tipo Cole.

Tabela 4. Localização dos pontos de medição correspondentes aos valores de distância relativa y/D do centro do *tip* do tubo de Pitot Cole até a parede do conduto e tolerâncias.

Posição	Distância relativa y/D_i
1	$0,981\ 1 \pm 0,000\ 9$
2	$0,923\ 5 \pm 0,003\ 8$
3	$0,847\ 5 \pm 0,005\ 0$
4	$0,782\ 9 \pm 0,005\ 0$
5	$0,638\ 8 \pm 0,005\ 0$
6	$0,500\ 0 \pm 0,005\ 0$
7	$0,361\ 2 \pm 0,005\ 0$
8	$0,217\ 1 \pm 0,005\ 0$
9	$0,152\ 5 \pm 0,005\ 0$
10	$0,076\ 5 \pm 0,003\ 8$
11	$0,018\ 9 \pm 0,000\ 9$

onde:

y : distância do centro do *tip* até a parede do conduto;

D : diâmetro interno do tubo medido com o galgador (cálibre).

- **Correção devido à distância do centro do *tip* à extremidade inferior do tubo de Pitot**

Para que o centro do *tip* do tubo de Pitot seja posicionado exatamente conforme o método *Log-linear* estabelecido na norma NBR ISO 3966 [11], o ponto extremo do tubo de Pitot, ou seja, aquele que toca a parede do conduto quando o tubo de Pitot está completamente inserido deve ser instalado segundo as posições apresentadas na **Tabela 5** a seguir.

Tabela 5. Distâncias corrigidas y_c da extremidade inferior do tubo de Pitot do tipo Cole até a parede do conduto e suas tolerâncias.

Posição	Distância corrigida y_c
1	$(0,981\ 1 \pm 0,000\ 9)\ D - L$
2	$(0,923\ 5 \pm 0,003\ 8)\ D - L$
3	$(0,847\ 5 \pm 0,005\ 0)\ D - L$
4	$(0,782\ 9 \pm 0,005\ 0)\ D - L$
5	$(0,638\ 8 \pm 0,005\ 0)\ D - L$
6	$(0,500\ 0 \pm 0,005\ 0)\ D - L$
7	$(0,361\ 2 \pm 0,005\ 0)\ D - L$
8	$(0,217\ 1 \pm 0,005\ 0)\ D - L$
9	$(0,152\ 5 \pm 0,005\ 0)\ D - L$
10	$(0,076\ 5 \pm 0,003\ 8)\ D - L$
11	$(0,018\ 9 \pm 0,000\ 9)\ D - L$

onde:

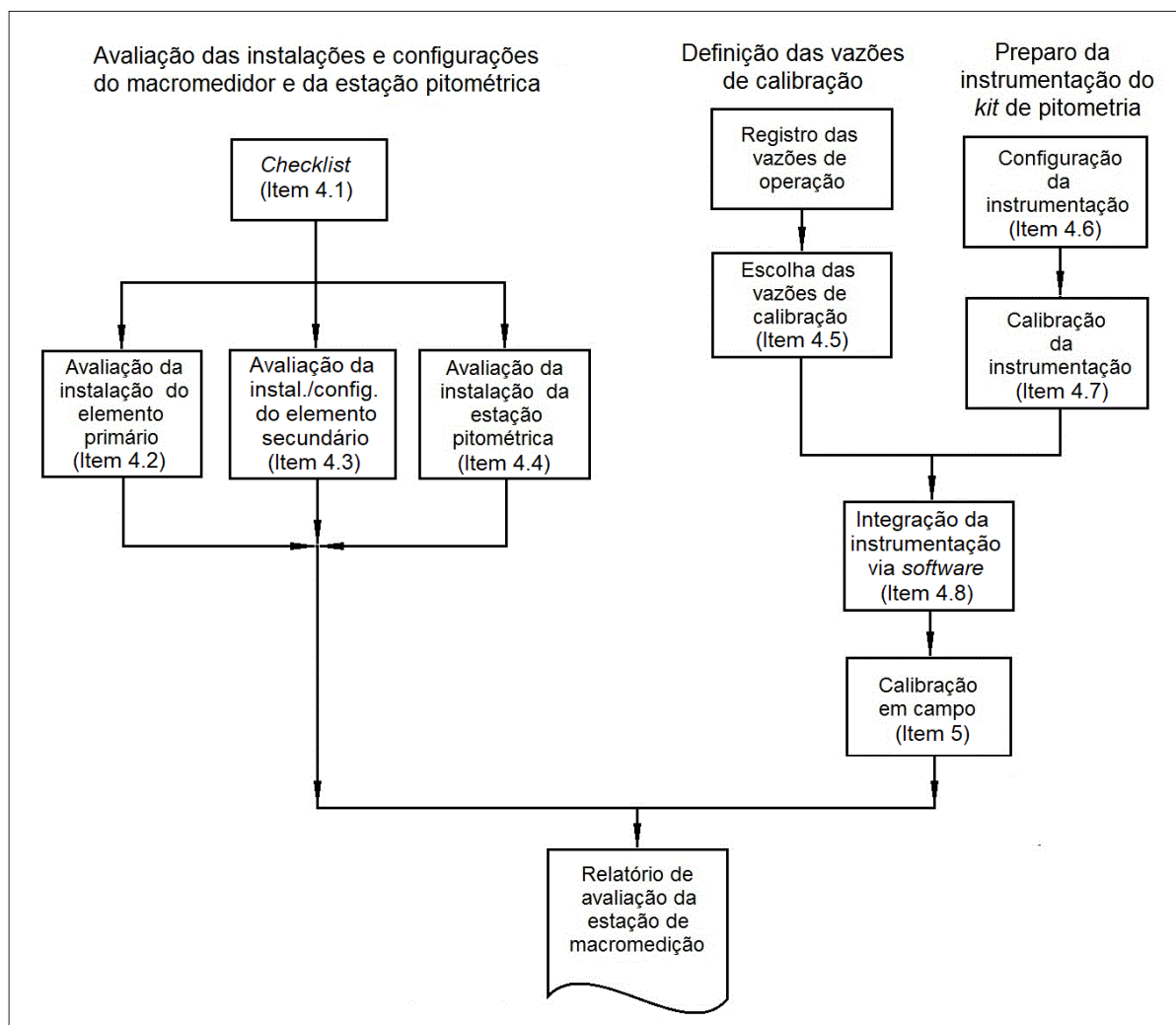
L : distância do centro do *tip* à extremidade inferior do tubo de Pitot;

y_c : distância da extremidade inferior do tubo de Pitot até a parede do conduto.

NOTA: A norma NBR ISO 3966 [11] estabelece o mapeamento do perfil e velocidades por meio de três ou cinco áreas concêntricas, que definem respectivamente seis ou dez pontos de medição ao longo do diâmetro de varredura. Dessa forma, o ponto central (ponto 6) nas **Tabelas 4 e 5** é a posição para a medição da velocidade utilizada para a determinação do *Fator de Velocidade* (*FV*), conforme descrito no **Item 3.5** deste Manual.

5-CALIBRAÇÃO EM CAMPO

A **Figura 91** apresenta um fluxograma geral das etapas que compõem a metodologia de calibração de macromedidores de vazão de água em campo utilizando o método de mapeamento pitométrico do perfil de velocidades do escoamento. Além da calibração do medidor, a metodologia apresentada envolve também a realização de uma avaliação da estação de macromedição.



Fonte: IPT

Figura 91. Fluxograma geral da metodologia de calibração de macromedidores por pitometria.

A metodologia de avaliação e calibração de macromedidores de vazão de água em campo inicia-se por meio de três processos independentes:

- avaliação das instalações e configurações do macromedidor e da estação pitométrica;
- definição das vazões de calibração;
- preparo da instrumentação do kit de pitometria.

5.1 Avaliação das instalações e configurações do macromedidor a ser calibrado e da estação pitométrica

Essa avaliação é composta por dois blocos: o do *checklist* e o das avaliações.

5.1.1 Checklist:

É um procedimento que deve ser aplicado pela equipe de campo durante uma visita ao local. No *checklist* é realizada a identificação do macromedidor, com seus elementos primário e secundário, e da estação pitométrica (EP). No Item 4.1 deste Manual é fornecida a ficha de *checklist* e uma explicação item-a-item da mesma.

5.1.2 Avaliações

São análises realizadas por pessoal competente em medição de vazão com base nas informações do *checklist* e divididas em três módulos:

- **Avaliação do elemento primário:** o elemento primário é o componente do sistema de medição através do qual escoam a totalidade ou parte do fluido medido, podendo assim ser, por exemplo, o corpo do medidor de vazão do tipo eletromagnético, o tubo de Venturi ou os sensores ultrassônicos de vazão instalados na linha. Com base nas distâncias das singularidades (conexões, válvulas, filtros, bombas etc.) mais próximas do elemento primário a montante e a jusante, apontadas no *checklist*, deve ser avaliado se os comprimentos dos trechos retos de tubulação a montante e a jusante do medidor atendem aos valores mínimos definidos pela norma técnica específica que trata da instalação do elemento primário. Essas distâncias mínimas normalizadas ou recomendadas pelos fabricantes dos medidores de vazão são necessárias para a estabilização e o condicionamento do perfil de velocidades do escoamento na seção de medição. Esse processo de condicionamento do escoamento é um processo fluidodinâmico complexo que depende de fatores como o tipo de perturbação provocada pela conexão ou válvula adjacente ao elemento primário, a rugosidade da superfície interna da tubulação, a viscosidade da água, a turbulência de fundo, etc. Caso a distância existente não seja suficiente para a estabilização do perfil de velocidades do escoamento, é possível que o elemento primário seja submetido a um padrão de escoamento que não representa o comportamento geral do escoamento na seção, incorrendo em um erro de medida provocado mais pelo escoamento do que pelo medidor em si. O **Item 4.2** apresenta uma tabela retirada de norma técnica com as distâncias mínimas normalizadas para medidores por diferencial de pressão.
- **Avaliação do elemento secundário:** com base nas faixas de vazão de operação (fornecidas pelo fabricante do medidor), programada e de operação, é avaliada a adequação entre elas. O **Item 4.3** explica como realizar tal avaliação.

- **Avaliação da estação pitométrica:** com base nas distâncias das singularidades mais próximas da estação pitométrica, a montante e a jusante, apontadas no *checklist*, deve ser avaliado se os comprimentos dos trechos retos de tubulação a montante e a jusante da estação atendem aos requisitos de distâncias mínimas estabelecidas pela norma técnica ABNT NBR ISO 3966 [11], utilizada como referência para a instalação da estação pitométrica. O **Item 4.4** apresenta um resumo com os valores mínimos definidos pela referida norma.

5.2 Definição das vazões de calibração

O processo de definição das vazões de calibração é composto por dois módulos:

- **Registros das vazões de operação:** esses registros são importantes para definir as vazões de calibração. Os registros devem ser obtidos a partir de uma série temporal (data e horário) de uma base de dados de vazões indicadas pelo elemento secundário do macromedidor, preferencialmente no período referente aos últimos doze meses de operação do medidor em calibração.
- **Escolha das vazões de calibração:** a calibração do medidor deve idealmente ser realizada em pelo menos três vazões diferentes, dentro da faixa de operação do conduto onde está instalado o medidor, de modo a permitir a construção de uma curva do erro de medida em função da vazão ou do número de Reynolds do escoamento. O **Item 4.5** exemplifica maneiras de se escolher as vazões de calibração a partir dos registros de vazões de operação.

5.3 Preparo da instrumentação e do *kit* de pitometria

O preparo da instrumentação do *kit* de pitometria a ser utilizado é composto por dois módulos:

- **Configuração da instrumentação:** antes de realizar a primeira pitometria, é necessário efetuar a configuração da instrumentação do *kit* de pitometria (transdutores de pressão e conversor A/D) quanto aos parâmetros: faixa de operação, *damping* etc. O **Item 4.6** apresenta, passo a passo, esse processo.
- **Calibração da instrumentação:** após a configuração dos instrumentos, estes devem ser calibrados. O **Item 4.7** descreve esse processo.

Importante: o módulo de calibração deverá ser executado periodicamente, em intervalos não superiores a 6 meses, ou sempre que ocorrer algum evento anormal tal como sobrecarga, queda, manutenção, processo de ajuste de *trim* ou de *span* etc.

Depois de realizados os módulos de configuração, calibração e escolha da instrumentação, a equipe de campo poderá se deslocar para o local de medição, onde será realizada a integração da instrumentação via *software*. Esta integração encontra-se descrita no **Item 4.8**.

Completada a integração, deve ser dado início ao módulo de calibração em campo.

Após a calibração em campo, deve-se realizar a análise dos resultados da calibração. Essa análise é acrescentada às informações geradas nos blocos avaliação das instalações e configurações do macromedidor (elementos primário e secundário) e da estação pitométrica para, finalmente, gerar o Relatório de Avaliação da Estação de Macromedição.

5.4 Realização da calibração em campo

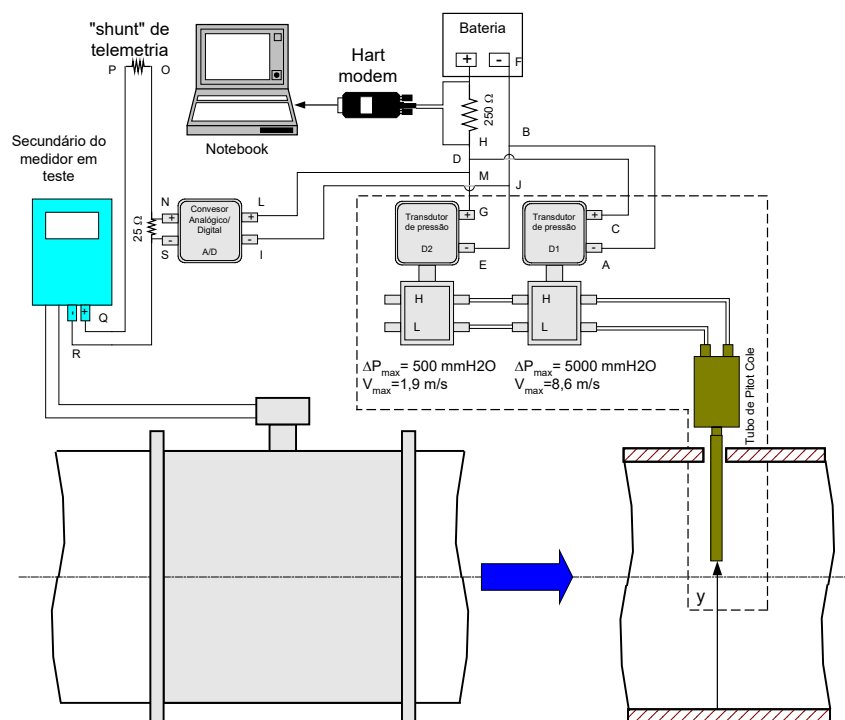
Após a realização da escolha das vazões de calibração, da configuração da instrumentação e da sua calibração, pode ser dado início efetivamente à calibração do macromedidor em campo.

5.4.1 Instalação

Uma diferença nas instalações de pitometria para a calibração de medidores de vazão dos tipos eletromagnético e por diferencial de pressão está no tipo de elemento secundário a partir do qual é obtido o sinal de vazão. Para medidores eletromagnéticos, o elemento secundário é o conversor do medidor. No caso de medidores de vazão por diferencial de pressão, o elemento secundário é tipicamente um transdutor de pressão com saída em raiz quadrada.

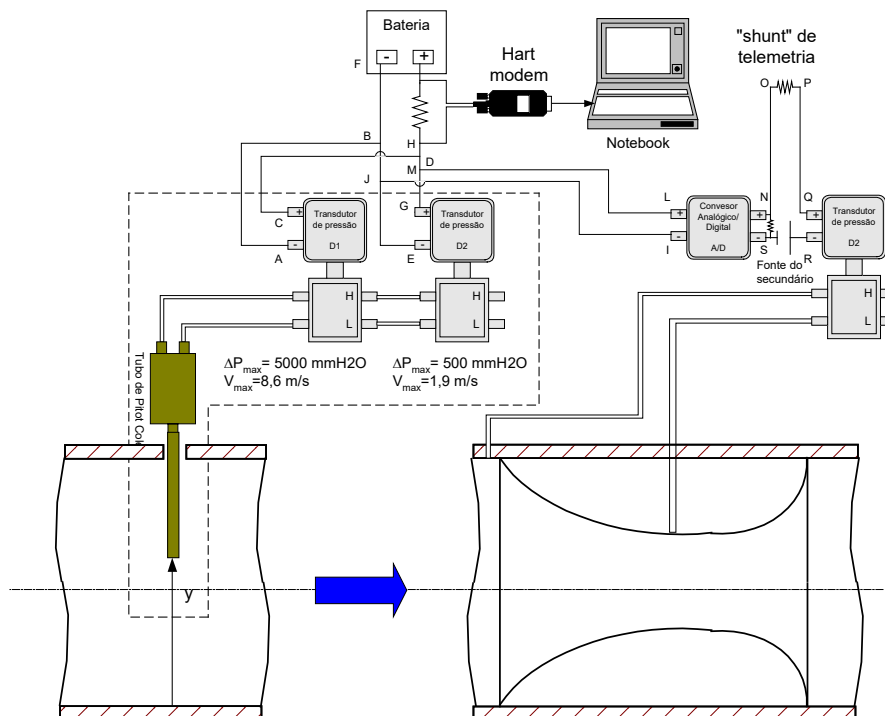
A **Figura 92** e a **Figura 93** apresentam, respectivamente, os esquemas para as instalações de pitometria para a calibração de medidores eletromagnéticos e por diferencial de pressão.

Pode-se observar que a instrumentação associada ao tubo de Pitot que aparece dentro da área tracejada nas duas figuras é comum para as duas aplicações de pitometria.



Fonte: IPT

Figura 92. Instalação de pitometria para a calibração de medidores eletromagnéticos.



Fonte: IPT

Figura 93. Instalação de pitometria para a calibração de medidores por diferencial de pressão.

Como é possível se observar pelas figuras anteriores, os transdutores de pressão do kit de pitometria estão ligados em paralelo com as tomadas de pressão do tubo de Pitot, de modo que ambos possam estar submetidos ao mesmo diferencial de pressão. O uso de transdutores de pressão com faixas de operação diferentes para medir o mesmo diferencial de pressão, permite a escolha, via *software*, do transdutor mais apropriado a cada diferencial de pressão, respeitando-se os limites indicados na **Tabela 6**.

A referida tabela apresenta as características da instrumentação associada ao tubo de Pitot.

Tabela 6. Instrumentação associada ao tubo de Pitot.

Descrição	Faixa de operação (mmca) (*)	Faixa de uso (mmca) (**)
Transdutor de pressão D0	5 – 100 (1:20)	12,5 – 90
Transdutor de pressão D1	12,5 – 500 (1:40)	12,5 – 450
Transdutor de pressão D2	42 – 5000 (1:120)	42 – 4800

(*) dados válidos para transdutores de pressão da marca Smar, modelo LD 301;

(**) para evitar a saturação da leitura dos transdutores de pressão devido ao elevado nível de flutuação do diferencial de pressão do tubo de Pitot quando em uso, os seus limites superiores devem ser reduzidos, mesmo considerando o limite superior configurado pelo fabricante.

O **Item 4.9** apresenta os arranjos físicos elétricos da instrumentação para calibração de medidores de vazão do tipo eletromagnético e do tipo pressão diferencial (tubo de Venturi, tubo de Dall etc.).

5.4.2 Sequência de calibração

Antes de se iniciar a sequência de calibração, as seguintes tarefas devem ser realizadas:

- medição do diâmetro interno da tubulação, com um instrumento especial denominado calibre ou galgador, conforme descrito no **Item 4.10**;
- instalação da instrumentação, como descrito no **Item 5.4.1**;
- integração da instrumentação, conforme descrito no **Item 4.8**.

Deve-se providenciar também uma mesa e uma cobertura para a instalação do *notebook* e da instrumentação, que não devem ficar expostos à chuva ou a uma insolação forte.

5.4.2.1 Inserção de dados iniciais

Realizadas essas tarefas, já deve existir comunicação entre a planilha de pitometria e a instrumentação, podendo-se iniciar a sequência de calibração.

A primeira etapa consiste no preenchimento da **Planilha Dados_Iniciais** da planilha de pitometria em plataforma Microsoft Excel®, conforme orientações das **Figuras 94, 95, 96 e 97**.

Antes de iniciar, é importante definir uma convenção para a planilha. Os campos que possuem os caracteres em vermelho devem ser preenchidos pelo usuário e os campos que possuem os caracteres em azul são dados calculados pela própria planilha e, assim, estarão protegidos.

Segue-se a sequência de preenchimento:

Planilha Dados_Iniciais									
DADOS INICIAIS DO PONTO DE MEDIÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO									
1) Trabalho :	Macromedição Baixada Santista				5) Diâmetro nominal :	900 mm			
2) Local de medição:	FTGJ0005 Piaçaguera Velha				6) Diâmetro Interno :	912 mm			
3) Data da medição :	14.10.2003				7) L: Distância do centro do tip à extremidade inferior do tubo de Pitot	2,4 mm			
4) Executante(s) :	Fernando/Rodrigo								
8) Tubo de Pitot	Tag:	ETA EP18 OHD			vertical	lado B			
9) Equações de calibração									
transdutores de pressão				D1	D2	10) Canais		11) Valores	
DP(mmca)=(DPind+b)*a				9.1) coef. b=	-0,0943	-0,8320	D1	pressão	
				9.2) coef. a=	0,9979	0,8868	D2	pressão	
9.3) Incerteza (mmH2O)				1,367	2,478	Secundário Testado		Sinal Hart	
9.4) fator de abrangência				2,2	2,2			Sinal Hart	
12) Medidor Primário eletromagnético									
Q (m³/s)=((mV - b)/a)*Qmax				coef. a=	400,00	16) Tubo de Pitot			
				coef. b=	100,00	Pitot	Cd	K (Pitot)	incerteza
13) Qmax (m³/s)				0,931			0,8720	3,8653	0,0080
14) Diretório:				C:\NPT\Planilha\					
15) K venturi				1,1660 m³/s/mH2O ^{1/2}					
Incerteza Incrustação				0,003	17) A Posição 1 é atingida?		Não	18) Valor Medido (mm)	
Incerteza Leitura de Posição				0,001	Planilha de Aquisição				

Preencher os campos:

1) **Trabalho:** nome ou referência do trabalho que está sendo executado.

2) **Local de medição:** código de identificação (tag) e nome do ponto de medição.

3) **Data da medição:** dd.mm.aaaa

4) **Executantes:** nomes dos membros da equipe executora do serviço.

5) **Diâmetro nominal:** diâmetro nominal da linha, em mm.

6) **Diâmetro interno:** diâmetro interno da linha, medido com o uso do calibre ou galgador, em mm.

7) **L (distância do centro do tip à extremidade inferior do tubo Pitot):** em mm. Ver definição no item 4.11.

8) **Tubo de Pitot:**

- **Tag:** código de identificação do tubo de Pitot.
- **Janela vertical ou horizontal:** escolher a direção utilizada na varredura (traverse).
- **Janela lado A ou lado B:** escolher o lado do tubo de Pitot. Ver definição no Item 4.12.
- **Janela Pitot normal ou Pitot reforçado:** escolher o tipo de tubo de Pitot utilizado, se o reforçado ou se o normal.

Figura 94. Preenchimento da Planilha Dados_Iniciais.

Planilha Dados_Iniciais									
Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda									
	B	C	D	E	F	G	H	I	
1	DADOS INICIAIS DO PONTO DE MEDIÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO								
2	1) Trabalho :	Macromedição Baixada Santista				5) Diâmetro nominal :	900 mm		
3	2) Local de medição:	FTGJ0005 Piaçaguera Velha				6) Diâmetro Interno :	912 mm		
4	3) Data da medição :	14.10.2003				7) L: Distância do centro do tip à extremidade inferior do tubo de Pitot	2,4 mm		
5	4) Executante(s) :	Fernando/Rodrigo							
6	8) Tubo de Pitot	Tag:	ETA EP18 OHD			vertical	lado B		
8	9) Equações de calibração								
10	transdutores de pressão				D1	D2	10) Canais		11) Valores
11	DP(mmca)=(DPind+b)*a				9.1) coef. b=	-0,0943	-0,8320	D1	pressão
12					9.2) coef. a=	0,9979	0,8868	D2	pressão
13	9.3) Incerteza (mmH ₂ O)				1,367	2,478	Secundário Testado	Sinal Hart	
14	9.4) fator de abrangência				2,2	2,2	-	Sinal Hart	
15									
17	12) Medidor Primário	eletromagnético				16) Tubo de Pitot			
18	Q (m ³ /s)=((mV - b)/a)*Q _{max}				coef. a=	400,00		C _d	K (Pitot)
19					coef. b=	100,00	Pitot	0,8720	3,8653
20	13) Q _{max} (m ³ /s)				0,931				incerteza
21	14) Diretório:				C:\IPT\Planilha\				
22	15) K _{venturi}				1,1660 m ³ /s/mH ₂ O ^{1/2}				
23	Incerteza Incrustação				0,003	17) A Posição 1 é atingida?	Não	18) Valor Medido (mm)	892
24	Incerteza Leitura de Posição				0,001	Planilha de Aquisição			
25									
26									
27									
Dados_Iniciais Aquisição Processamento V Resultados Incerteza Dispersão Estimativa V									
Fechar tela inteira									

Preencher os campos:	
<p>9) Equações de calibração os campos:</p> <p>9.1) coef. b=</p> <p>9.2) coef. a=</p> <p>9.3) Incerteza (mmH₂O)</p> <p>9.4) fator de abrangência</p> <p>para os transdutores de pressão:</p> <ul style="list-style-type: none"> - D1; - D2. - DP_{prim} (desconsiderar para esta aplicação) <p>Estes coeficientes foram obtidos na calibração da instrumentação descrita no Item 4.7.</p> <p>Os coeficientes do transdutor de pressão DP_{prim} devem ser preenchidos com os valores mostrados na tela. Este transdutor não é utilizado para esta aplicação.</p>	<p>Na coluna</p> <p>10) Canais: selecionar a janela</p> <ul style="list-style-type: none"> - D1 se for utilizar os transdutores D1 e D2; - D0 se for utilizar transdutores D0 e D1. <p>Selecionar as janelas da coluna</p> <p>11) Valores: conforme apresentado ao lado.</p> <p>12) Medidor Primário com:</p> <ul style="list-style-type: none"> - dif. pressão se o medidor em calibração for do tipo diferencial de pressão; - eletromagnético ou ultrassônico se o medidor em calibração for do tipo eletromagnético ou ultrassônico. <p>Os valores dos coeficientes coef. a= e coef. b= não devem ser alterados.</p>

Figura 95. Preenchimento da Planilha Dados_Iniciais (cont.)

Planilha Dados_Iniciais										
Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda										
	B	C	D	E	F	G	H	I		
1	DADOS INICIAIS DO PONTO DE MEDIÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO									
2	1) Trabalho :	Macromedição Baixada Santista				5) Diâmetro nominal :	900 mm			
3	2) Local de medição:	FTGJ0005 Piaçaguera Velha				6) Diâmetro Interno :	912 mm			
4	3) Data da medição :	14.10.2003				7) L: Distância do centro do tip à extremidade inferior do tubo de Pitot	2,4 mm			
5	4) Executante(s) :	Fernando/Rodrigo								
6	8) Tubo de Pitot	Tag:	ETA EP18 OHD		vertical	lado B				
8	9) Equações de calibração									
10	transdutores de pressão				D1	D2	10) Canais		11) Valores	
11	DP(mmca)=(DPind+b)*a				9.1) coef. b=	-0,0943	-0,8320	D1	pressão	
12					9.2) coef. a=	0,9979	0,8868	D2	pressão	
13	9.3) Incerteza (mmH2O)				1,367	2,478	Secundário Testado		Sinal Hart	
14	9.4) fator de abrangência				2,2	2,2	-		Sinal Hart	
15										
17	12) Medidor Primário	eletromagnético		16) Tubo de Pitot						
18	Q (m³/s)=((mV - b)/a)*Qmax		coef. a=	400,00		Cd	K (Pitot)	incerteza		
19			coef. b=	100,00	Pitot	0,8720	3,8653	0,0080		
20	13) Qmax (m³/s)		0,931							
21	14) Diretório:		C:\IPT\Planilha\							
22	15) K _{venturi}		1,1660 m³/s/mH2O ^{1/2}							
23	Incerteza Incrustação		0,003	17) A Posição 1 é atingida?	Não	18) Valor Medido (mm)		892		
24	Incerteza Leitura de Posiç		0,001	Planilha de Aquisição						
25										
26										
27										
Dados_Iniciais Aquisição Processamento V Resultados Incerteza Dispersão Estimativa V										
Fechar tela inteira										

Preencher os campos:

Se na janela

12) **Medidor Primário** foi selecionado **dif. pressão**, preencher os campos:

13) DP_{max} (mH₂O) do *span* programado no **transdutor** do elemento primário do medidor e o campo

15) $K_{venturi}$ definido com:

onde:

Q_{max} : vazão máxima ajustada no medidor;

ΔP_{max} : diferencial de pressão máximo ajustado no secundário.

Se na janela

12) **Medidor Primário** foi selecionado **eletromagnético**, preencher os campos:

13) Q_{max} (m³/s) do *span* de vazão programado no medidor eletromagnético.

14) **Diretório** com o endereço do diretório em que serão **gravados** os arquivos de *back-up* das amostras de dados coletados. Ex.: C:\IPT\Planilha\

Figura 96. Preenchimento da Planilha Dados_Iniciais (cont.)

Planilha Dados_Iniciais									
Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda									
DADOS INICIAIS DO PONTO DE MEDIÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO									
1) Trabalho :	Macromedição Baixada Santista				5) Diâmetro nominal :	900 mm			
2) Local de medição:	FTGJ0005 Piaçaguera Velha				6) Diâmetro Interno :	912 mm			
3) Data da medição :	14.10.2003				7) L: Distância do centro do tip à extremidade inferior do tubo de Pitot	2,4 mm			
4) Executante(s) :	Fernando/Rodrigo								
8) Tubo de Pitot	Tag:	ETA EP18 OHD			vertical	lado B			
9) Equações de calibração									
transdutores de pressão		D1	D2			10) Canais		11) Valores	
DP(mmca)=(DPind+b)*a		9.1) coef. b=	-0,0943	-0,8320			D1	pressão	
		9.2) coef. a=	0,9979	0,8868			D2	pressão	
9.3) Incerteza (mmH2O)		1,367		2,478			Secundário Testado	Sinal Hart	
9.4) fator de abrangência		2,2		2,2			-	Sinal Hart	
12) Medidor Primário		eletromagnético		16) Tubo de Pitot					
Q (m³/s)=(mV - b)/a*Qmax		coef. a=	400,00		Cd	K (Pitot)	incerteza		
		coef. b=	100,00	Pitot	0,8720	3,8653	0,0080		
13) Qmax (m³/s)		0,931							
14) Diretório:		C:\IPT\Planilha\							
15) K venturi		1,1660 m³/s/mH2O ^{1/2}							
Incerteza Incrustação		0,003	17) A Posição 1 é atingida?	Não	18) Valor Medido (mm)		892		
Incerteza Leitura de Posiç		0,001	Planilha de Aquisição						
Dados_Iniciais Aquisição Processamento V Resultados Incerteza Dispersão Estimativa V									
Fechar tela inteira									

Preencher os campos:

16) Tubo de Pitot:

Cd: coeficiente de calibração do tubo de Pitot utilizado;

incerteza: incerteza associada ao valor do coeficiente de calibração do tubo de Pitot.

Estes dados são obtidos do certificado de calibração do tubo de Pitot.

Figura 97. Preenchimento da Planilha Dados_Iniciais (cont.)

Encerrado o preenchimento dos dados nos campos da **Planilha Dados_Iniciais**, recomenda-se que a planilha seja renomeada e salva no diretório definido na janela 14 da planilha.

Deve-se observar a fidelidade dos dados preenchidos nessa planilha. Caso necessário, estes dados podem ser alterados sem o comprometimento dos dados já “aquisitados” da instrumentação de campo.

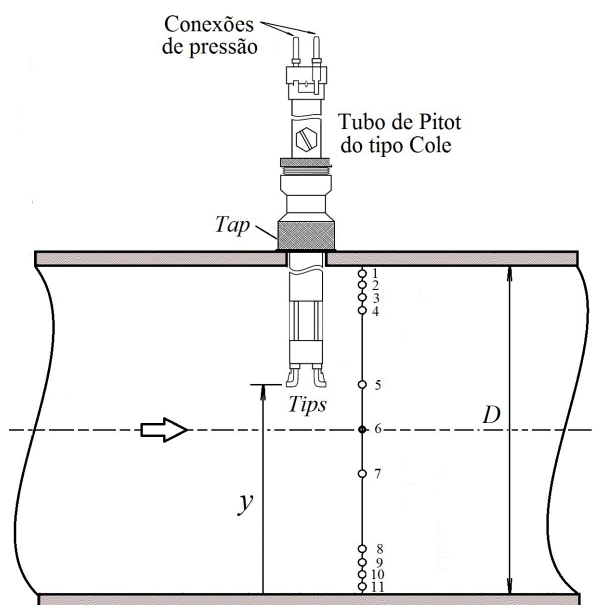
5.4.2.2 Posicionamento do tubo de Pitot

Preenchida a **Planilha Dados_Iniciais**, é necessário instalar o tubo de Pitot no *tap* e posicioná-lo no primeiro ponto de medição.

Conforme citado anteriormente neste manual, de acordo com as orientações da norma ABNT NBR ISO 3966 [11], para o cálculo da velocidade média na seção da tubulação utilizando o tubo de Pitot e o método “Log-linear” de integração, é necessário realizar a medição das velocidades do escoamento em pontos específicos ao longo de cada diâmetro de varredura. Isso é necessário porque o perfil de velocidades de um escoamento apresenta um formato característico, normalmente com velocidades maiores na região central e menores nas regiões próximas às paredes internas do conduto. Cada seção de medição pode apresentar um formato de perfil de velocidades diferente que dependerá da condição do escoamento estabelecida em função do nível de perturbação gerada pelas conexões, válvulas ou outras singularidades existentes a montante da seção de medição, dos trechos retos de tubulação presentes a montante e a jusante da seção de medição, da rugosidade das paredes do conduto, entre outros fatores.

Na metodologia desenvolvida pelo IPT, além da medição da velocidade do escoamento nos dez pontos referentes às cinco áreas concêntricas da seção transversal do duto, é realizada uma medição adicional no ponto central do conduto (ponto 6) com o objetivo de se determinar o *fator de velocidade FV*, que é utilizado no cálculo da vazão pelo método da pitometria. O *fator de velocidade FV* resulta da relação entre a velocidade média do escoamento e a velocidade medida no ponto central do conduto. Ou seja, .

A **Figura 98** mostra uma ilustração com as posições dos pontos de medição e do eixo de referência y . Este eixo y se inicia no ponto na parede interna da tubulação diametralmente oposto ao *tap*.



Fonte: IPT

Figura 98. Posições ao longo do diâmetro do conduto em que devem ser realizadas as medições da velocidade do escoamento com o tubo de Pitot do tipo Cole.

As posições das medidas aparecem na coluna **distância corrigida (mm)** da **Planilha Resultados**, conforme assinalado com o retângulo vermelho na **Figura 99**. Estas posições são as distâncias que o ponto extremo do tubo de Pitot deve estar para que o centro do *tip* esteja nas posições determinadas pela norma. O ponto extremo é aquele em que a ponta do tubo de Pitot toca a parede interna oposta da tubulação quando está inserido no *tap*.

No **Item 4.13** é apresentado como são calculadas as posições do ponto extremo do tubo de Pitot.

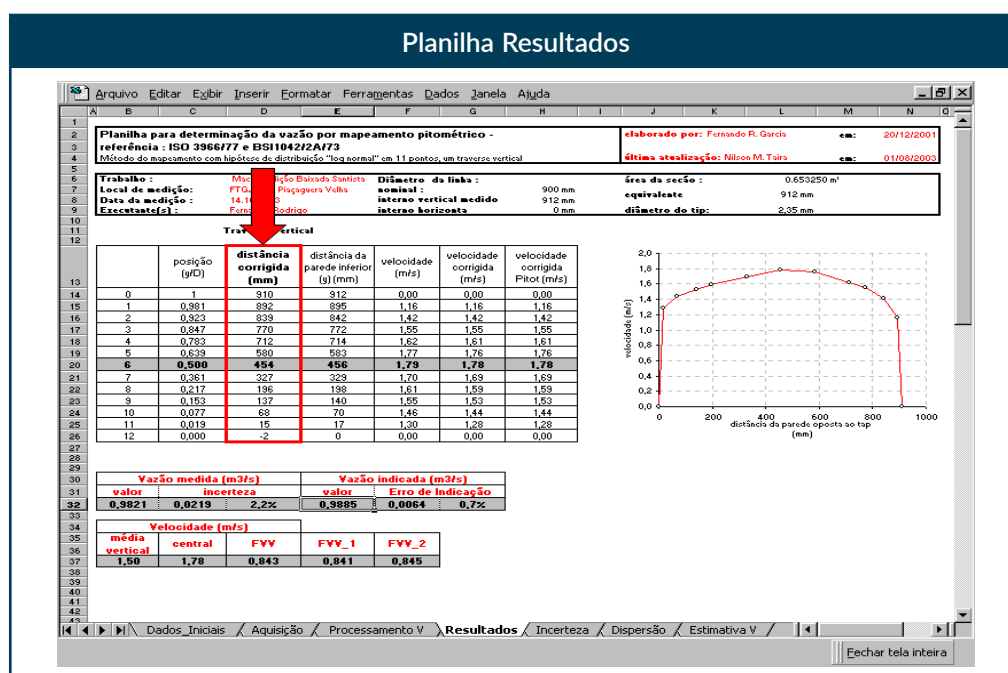


Figura 99. Posições para o tubo de Pitot do tipo Cole.

Exemplo para uma tubulação de 912 mm de diâmetro interno.

Na prática, o posicionamento do tubo de Pitot é feito da seguinte maneira:

- as posições referentes aos valores dados na coluna “**distância corrigida**” são marcadas (com caneta especial para metal ou pedaços de fita isolante) em uma régua metálica conforme mostradas na **Foto 1**;
- o tubo de Pitot é rosqueado no *tap*, alinhado e inserido cuidadosamente até que a extremidade da sonda toque o fundo da tubulação, **Foto 2**;
- deve-se descer o marcador existente na haste do tubo de Pitot até o seu curso final e travá-lo com o parafuso nele existente, **Foto 3**;
- retirar cuidadosamente o tubo de Pitot até o ponto em que a distância entre a superfície inferior do marcador e o seu curso final seja igual à distância marcada na régua, correspondente à posição desejada, **Foto 4**.



Foto 1. Régua com a marcação das posições de medição.



Foto 2. Tubo de Pitot sendo inserido até o fundo da tubulação.



Foto 3. Marcador travado no fim de curso.



Foto 4. Posicionamento do tubo de Pitot no ponto de medição.

O primeiro passo para iniciar as medições de velocidade é colocar o tubo de Pitot na posição 1 indicada na **Figura 98**. Este posicionamento nem sempre é possível, devido à eventual penetração da rosca do *tap* na tubulação. Quando isto acontecer, deve-se elevar ao máximo o tubo de Pitot e medir qual foi o seu deslocamento, como apresentado na **Foto 5**.



Foto 5. Medição do deslocamento máximo do tubo de Pitot

Neste caso, na **Planilha Dados_Iniciais**, como mostrado na **Figura 100**, deve-se selecionar a janela **17 Posição 1 é atingida?** para **Não**. Preencher o campo **18 Valor Medido (mm)** com o deslocamento máximo medido no tubo de Pitot, no exemplo da figura o valor foi 892 mm.

Planilha Dados_Iniciais

	B	C	D	E	F	G	H	I
1	DADOS INICIAIS DO PONTO DE MEDIÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO							
2	1) Trabalho :	Macromedição Baixada Santista			5) Diâmetro nominal :	900 mm		
3	2) Local de medição:	FTGJ0005 Piaçaguera Velha			6) Diâmetro Interno :	912 mm		
4	3) Data da medição :	14.10.2003			7) L: Distância do centro do tip à extremidade inferior do tubo de Pitot	2,4 mm		
5	4) Executante(s) :	Fernando/Rodrigo						
6	8) Tubo de Pitot	Tag: ETA EP18 OHD		vertical	lado B			
8	9) Equações de calibração							
10	transdutores de pressão				D1		D2	
11	DP(mmca)=(DPind+b)*a				9.1) coef. b=		-0,0943	
12					9.2) coef. a=		0,9979	
13	9.3) Incerteza (mmH2O)				1,367		2,478	
14	9.4) fator de abrangência				2,2		2,2	
15								
16	12) Medidor Primário eletromagnético				16) Tubo de Pitot			
17	Q (m³/s)=(mV - b)/a)*Qmax				coef. a=		400,00	
18					coef. b=		100,00	
19	13) Qmax (m³/s)				0,931			
20	14) Diretório:				C:\IPT\Planilha\			
21	15) K venturi				1,1660 m³/s/mH2O ^{1/2}			
22	Incerteza Incrustação				0,003		17) A Posição 1 é atingida?	
23	Incerteza Leitura de Posição				0,001		Não	
24							18) Valor Medido (mm)	
25							892	
26	Planilha de Aquisição							
27								

Dados_Iniciais Aquisição Processamento V Resultados Incerteza Dispersão Estimativa V

Fechar tela inteira

Figura 100. Inserção de dados na **Planilha Dados_Iniciais** quando a posição 1 não puder ser atingida devido à penetração da rosca do *tap* na tubulação.

5.4.2.3 Sequência de medições para uma vazão

Com o tubo de Pitot na posição 1, entra-se na **Planilha Aquisição** e se inicia a medição das velocidades com o tubo de Pitot.

IMPORTANTE: Antes de dar início às medições, é necessário drenar os transmissores para eliminar eventual ar presente nos tubos de ligação entre o tubo de Pitot e os transmissores de pressão e, também, realizar a verificação do Zero nos instrumentos.

• Planilha Aquisição

Antes de apresentar os passos para a medição das velocidades, cabe uma explicação sobre o significado dos campos da **Planilha Aquisição** (**Figuras 101 e 102**) como se segue:

Planilha Aquisição

Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda														
1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	
2	0	19) Mapeamento com tubo de Pitot				20) Tempo	21) Dados do Medidor Testado				0	6	d	
3	0	dP Pitot	DESVPAD	dP Pitot	DESVPAD	Tempo	Valor Indic.	DESVPAD	Valor Indic.	DESVPAD				
4	39	D1	D1	D2	D2	medição	Secundário	Secundário	Secundário	Secundário				
		mmH2O	mmH2O	mmH2O	mmH2O	(s)	mV	mV	mV	mV				
5	39	450,62	0,16%	444,54	0,17%	56419	300,05	0,00%	300,05	0,00%	01/12/2004 15:40:54	Repetir Dados do Ponto acima		
6	média	449,63		445,57		33	300	300	300	300	01/12/2004 15:40:21			
7	veloc.	2,59		2,58		18)	Amostragem	300,0	300,05	300,05				
8	máximo	450,7		445,7		40	300,0	300,0	300,04	300,04	56419			
9	mínimo	448,4		443,3										
10	Iniciando Aquisição		Parar		Limpar Dados		Transferir dados para processamento		Apagar última aquisição		Próxima		Salvar Toda Planilha	
11													22) Vazão indicada pelo medidor testado	
12													562,68	
13	CONCLUÍDO													
14														
15	Mapeamento com tubo de Pitot													
16	P	dP Pit. Ideal	DESVPAD	dP Pit. Cols	DESVPAD	Tempo	Valor Indic.	DESVPAD	Velocidade	DESVPAD	Data/hora			
17	T	D1	D1	D2	D2	medição	Secundário	Secundário	Secundário	Secundário	Data/hora			
18	O	(mmH2O)	(mmH2O)	(mmH2O)	(mmH2O)	(s)	mV	mV	m/s	(mmH2O)	Data/hora			
19	*	448,36		443,27		56421	300,05	300,05	300,05	300,05	01/12/2004 15:40:21			
20	1	448,46		443,37		2	300,05	300,05	300,05	300,05	01/12/2004 15:40:23			
21	2	448,71		443,59		4	300,05	300,05	300,05	300,05	01/12/2004 15:40:25			
22	3	448,80		443,71		6	300,05	300,05	300,05	300,05	01/12/2004 15:40:27			
23	4	448,91		443,81		7	300,05	300,05	300,05	300,05	01/12/2004 15:40:28			
24	5	449,03		443,92		11	300,05	300,05	300,05	300,05	01/12/2004 15:40:32			
25	6	449,25		444,15		12	300,04	300,04	300,04	300,04	01/12/2004 15:40:33			
26	7	449,37		444,26		14	300,04	300,04	300,04	300,04	01/12/2004 15:40:35			
27	8	449,48		444,38		16	300,04	300,04	300,04	300,04	01/12/2004 15:40:37			
28	9	449,58		444,48		19	300,04	300,04	300,04	300,04	01/12/2004 15:40:40			
29	10	449,80		444,71		20	300,05	300,05	300,05	300,05	01/12/2004 15:40:41			
30	11	449,89		444,83		22	300,05	300,05	300,05	300,05	01/12/2004 15:40:43			
31	12	450,01		444,94		24	300,05	300,05	300,05	300,05	01/12/2004 15:40:45			
32	13	450,12		445,05		27	300,05	300,05	300,05	300,05	01/12/2004 15:40:48			
33	15	450,32		445,26		29	300,05	300,05	300,05	300,05	01/12/2004 15:40:50			
34	16	450,43		445,36		30	300,05	300,05	300,05	300,05	01/12/2004 15:40:51			
35	17	450,51		445,47		32	300,05	300,05	300,05	300,05	01/12/2004 15:40:53			
36	18	450,62		445,57		33	300,05	300,05	300,05	300,05	01/12/2004 15:40:54			
37	19	450,74		445,70		36	300,05	300,05	300,05	300,05	01/12/2004 15:40:57			
38	20	448,36		443,27		56421	300,05	300,05	300,05	300,05	01/12/2004 15:40:21			
39	21	448,46		443,37										

O **Item 6** apresenta a metodologia utilizada para a Calibração de medidores de água sem sinal de saída (medidores proporcionais – *Shunt* e *Woltmann*).

Planilha Aquisição

As colunas descritas acima são cortadas pelas linhas:

- atual**
- média**
- veloc.**
- máximo**
- mínimo**

Na linha **atual** aparecem os valores das medidas (diferencial de pressão e mV) que foram “aquisitadas”.

Esta linha é continuamente transferida para a tabela que fica abaixo dos botões de controle, nela ficam gravadas as amostras das medidas.

Na linha **média** aparecem os valores das médias e dos desvios padrão das amostras de medidas gravadas na tabela inferior. Os valores desta linha são transferidos para a planilha **Processamento V**, ao final da aquisição.

A linha **veloc.** apresenta as velocidades medidas com o tubo de Pitot utilizando os transdutores de pressão D1 e D2.

As linhas **máximo e mínimo** mostram os valores máximo e mínimo das amostras de medidas gravadas na tabela inferior.

Figura 102. Preenchimento da **Planilha Aquisição** (cont.).

- **Medição de velocidade**

Conhecidos os significados dos campos da **Planilha Aquisição** e posicionado o tubo de Pitot na posição 1, pode-se entrar na **Planilha Aquisição** e iniciar a medição das velocidades com o tubo de Pitot como segue:

- a. Selecionar os dados das duas tabelas superiores da **Planilha Processamento V** (Figura 103) e apagá-los.

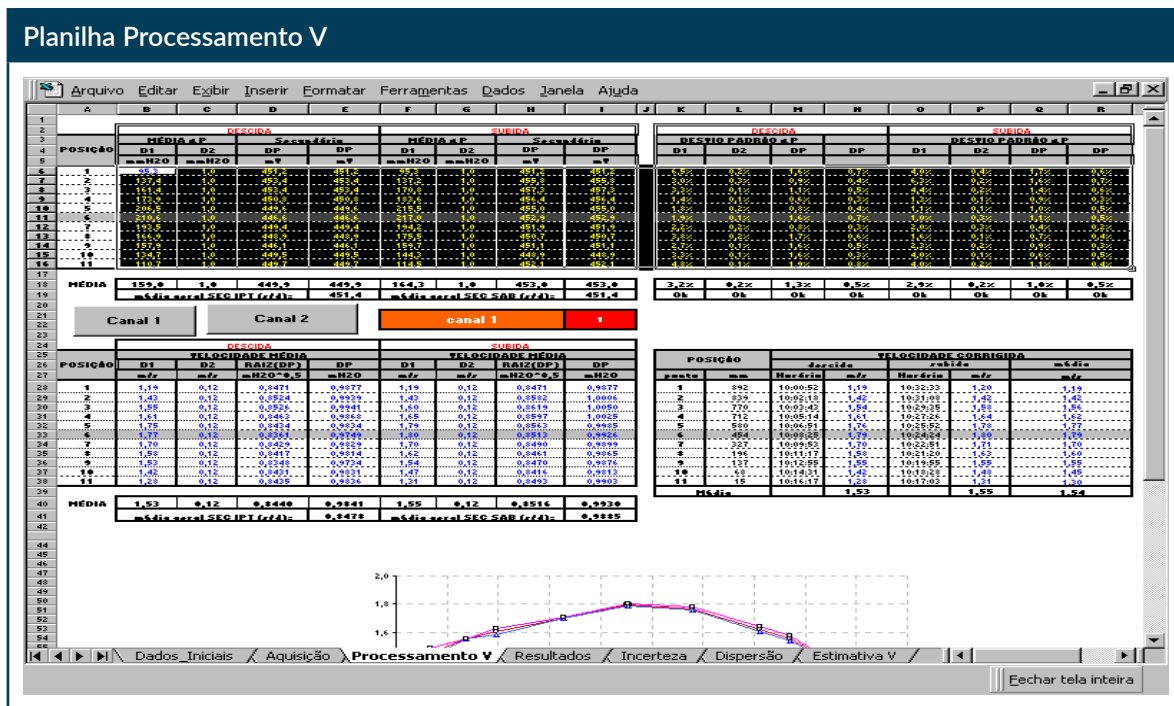


Figura 103. Preenchimento da Planilha Processamento V.

- b. Clicar no botão **Limpar Dados**

Neste ponto, observa-se na **Planilha Aquisição** a linha **atual** exibindo os valores das medidas de pressão diferencial do tubo de Pitot e da tensão elétrica (mV) do sinal do elemento secundário.

- c. Inserir o valor de 30 ou 40 amostragens no campo 18) **Amostragem** (Figura 104).

Planilha Aquisição

The screenshot displays the 'Planilha Aquisição' software. It features a data table with columns for 'Mapeamento com tubo de Pitot' and 'Dados do Medidor Testado'. The 'Atual' row is highlighted in red. The 'Amostragem' field is set to 40. The software has a menu bar (Arquivo, Editar, Exibir, Inserir, Formatar, Ferramentas, Dados, Janela, Ajuda) and a status bar at the bottom with navigation buttons and a 'Fechar tela inteira' button.

Planilha Aquisição									
Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda									
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	19) Mapeamento com tubo de Pitot	20) Tempo		21) Dados do Medidor Testado					
2	11	ΔP Pitot	DESVPAD	ΔP Pitot	DESVPAD	Tempo	Valor Indic.	DESVPAD	Valor Indic.
3	0	D1	D1	D2	D2	medição	Secundário	Secundário	Secundário
4	0	mmH2O	mmH2O	mmH2O	mmH2O	(s)	mV	mV	mV
5	atual	450,74		445,70		36		300	
6	média	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	0	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
7	veloc.	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	18)	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!
8	máxima	0,0		0,0		Amostragem	0,0	0,00	0,00
9	mínimo	0,0		0,0		40	0,0	0,00	0,00
10									
11	Iniciando	Parar	Limpar Dados	Transferir dados		Apagar última aquisição		Próxima	
12				para processamento					
13									
14	CONCLUÍDO								
15	Mapeamento com tubo de Pitot					Dados do Padrão Primário			
16	P	ΔP Pit. Ideal	DESVPAD	ΔP Pit. Cole	DESVPAD	Tempo	Valor Indic.	DESVPAD	Velocidade
17	T	D1	D1	D2	D2	medição	Secundário	Secundário	Secundário
18	O	(mmH2O)	(mmH2O)	(mmH2O)	(mmH2O)	(s)	mV	mV	(m/s)
19	*								
20	1								
21	2								
22	3								
23	4								
24	5								
25	6								
26	7								
27	8								
28	9								
29	10								

Figura 104. Preenchimento da **Planilha Aquisição** (cont.).

d. Clicar no botão **Iniciando Aquisição**.

Com isso, os dados começam a ser registrados na tabela inferior. No caso ilustrado na **Figura 105** já foram realizadas três aquisições. A qualquer momento, a aquisição pode ser interrompida utilizando-se o botão **Parar**.

Planilha Aquisição									
1	1	19) Mapeamento com tubo de Pitot			20) Tempo	21) Dados do Medidor Testado			
2	11	ΔP Pitot	DESVPAD	ΔP Pitot	DESVPAD	Tempo	Valor Indic.	DESVPAD	DESVPAD
3	0	D1	D1	D2	D2	medição	Secundário	Secundário	Secundário
4	4	mmH ₂ O	mmH ₂ O	mmH ₂ O	mmH ₂ O	(s)	mV	mV	mV
5	atual	450,74		445,70	36	300	300,05	300,05	300,05
6	média	448,58	0,04%	443,49	0,03%	4	0,00	0,00	0,00
7	veloc.	2,59		2,57		18)	0,00	0,00	0,00
8	máximo	448,8		443,7		Amostragem	300,0	300,05	300,05
9	mínimo	448,5		443,4	40		300,0	300,05	
10									
11	Iniciando	Parar	Limpar Dados	Transferir dados	Apagar última aquisição	Próxima			
12	Aquisição			para processamento					
13									
14	CONCLUÍDO								
15		Mapeamento com tubo de Pitot				Dados do Padrão Primário			
16	P	ΔP Pit. Ideal	DESVPAD	ΔP Pit. Cole	DESVPAD	Tempo	Valor Indic.	DESVPAD	DESVPAD
17	T	D1	D1	D2	D2	medição	Secundário	Secundário	Secundário
18	O	(mmH ₂ O)	(mmH ₂ O)	(mmH ₂ O)	(mmH ₂ O)	(s)	mV	mV	(mmH ₂ O)
19	*	448,36		443,27		56421	300,05	300,05	
20	1	448,46		443,37		2	300,05	300,05	
21	2	448,71		443,59		4	300,05	300,05	
22	3	448,80		443,71		6	300,05	300,05	
23	4								
24	5								
25	6								
26	7								
27	8								
28	9								
29	10								
30									
31									
32									
33									
34									
35									
36									
37									
38									
39									
40									
41									
42									
43									
44									
45									
46									
47									
48									
49									
50									
51									
52									
53									
54									
55									
56									
57									
58									
59									
60									
61									
62									
63									
64									
65									

Figura 105. Aquisição dos dados e preenchimento da **Planilha Aquisição** (cont.).

Ao completar as 30 ou 40 aquisições programadas, a planilha de pitometria automaticamente interrompe a aquisição de dados.

e. Clicar no botão **Transferir dados para processamento** (Figura 106).

Planilha Aquisição									
1	1	19) Mapeamento com tubo de Pitot			20) Tempo	21) Dados do Medidor Testado			
2	11	ΔP Pitot	DESVPAD	ΔP Pitot	DESVPAD	Tempo	Valor Indic.	DESVPAD	DESVPAD
3	0	D1	D1	D2	D2	medição	Secundário	Secundário	Secundário
4	39	mmH ₂ O	mmH ₂ O	mmH ₂ O	mmH ₂ O	(s)	mV	mV	mV
5	atual	450,74		445,70	36	300	300,05	300,05	300,05
6	média	449,63	0,16%	444,54	0,17%	56419	300,05	300,05	300,05
7	veloc.	2,59		2,58		18)	0,00	0,00	0,00
8	máximo	450,7		445,7		Amostragem	300,0	300,05	300,05
9	mínimo	448,4		443,3	40		300,0	300,04	
10									
11	Iniciando	Parar	Limpar Dados	Transferir dados	Apagar última aquisição	Próxima			
12	Aquisição			para processamento					
13									
14	CONCLUÍDO								
15		Mapeamento com tubo de Pitot				Dados do Padrão Primário			
16	P	ΔP Pit. Ideal	DESVPAD	ΔP Pit. Cole	DESVPAD	Tempo	Valor Indic.	DESVPAD	DESVPAD
17	T	D1	D1	D2	D2	medição	Secundário	Secundário	Secundário
18	O	(mmH ₂ O)	(mmH ₂ O)	(mmH ₂ O)	(mmH ₂ O)	(s)	mV	mV	(mmH ₂ O)
55	38	450,62		445,57		33	300,05	300,05	
56	39	450,74		445,70		36	300,05	300,05	
57	40	450,62		445,57		33	300,05	300,05	
58	41								
59	42								
60	43								
61	44								
62	45								
63	46								
64	47								
65	48								
66	49								
67									
68									
69									
70									
71									
72									
73									
74									
75									
76									
77									
78									
79									
80									
81									
82									
83									
84									
85									

Figura 106. Transferência dos dados da **Planilha Aquisição** (cont.).

Após isso, pode-se observar na **Planilha Processamento V** (Figura 107), os dados da linha média da **Planilha Aquisição** já transferidos.

Planilha Processamento V

Figura 107. Preenchimento da Planilha Processamento V.

- f. Voltar para a **Planilha Aquisição** ((Figura 108) e acionar o botão **Limpar Dados** para remover os dados da última medição.

IMPORTANTE: Esta operação se faz necessária sempre que for iniciada uma nova rodada de medições, caso contrário haverá uma “mistura” de dados “aquisitados” novos e antigos, comprometendo os resultados da medição.

Planilha Aquisição

Figura 108. Preenchimento da Planilha Aquisição (cont.).

g. A partir deste ponto, os passos se repetem da seguinte forma:

- posicionar o tubo de Pitot na posição seguinte;
- aguardar entre 10 e 15 segundos para estabilizar as leituras dos transdutores para a nova posição do tubo de Pitot;
- acionar o botão **Iniciar Aquisição**, na **Planilha Aquisição**;
- aguardar o término da aquisição;
- acionar o botão **Transferir dados para processamento**, na **Planilha Aquisição**;
- clicar o botão **Limpar Dados**, na **Planilha Aquisição**.

A sequência de pontos onde o *tip* do tubo de Pitot deve ser posicionado é 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1. Ou seja, a partir da posição 1, que é a posição de medição mais próxima do *tap* (tubo de Pitot mais extraído), executa-se a varredura das velocidades do escoamento, ponto a ponto, inserindo-se o tubo de Pitot ao longo do diâmetro do tubo até alcançar o ponto 11, posição onde a velocidade é medida duas vezes, iniciando-se em seguida a extração do tubo de Pitot, ponto a ponto, até retornar à posição 1. Deste modo, as velocidades do escoamento são medidas duas vezes em cada posição.

Terminada a sequência de medições, já será possível observar, na **Planilha Processamento V** o gráfico das velocidades em função das distâncias a partir da parede interna da tubulação oposta ao *tap*, conforme apresentado na **Figura 109**.

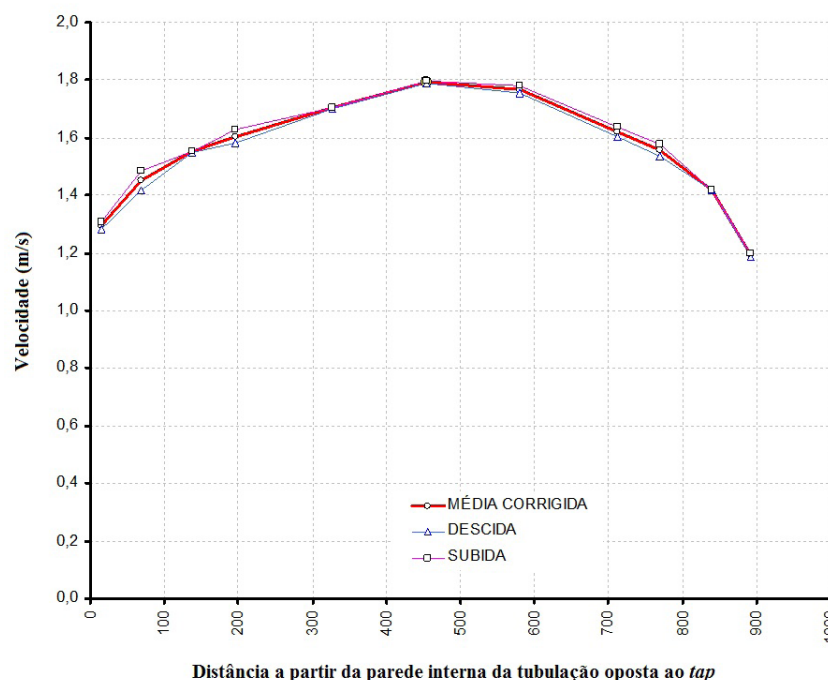


Figura 109. Exemplo de gráfico de velocidades medidas em função das distâncias a partir da parede interna da tubulação oposta ao *tap*

5.4.2.4 Planilha Processamento V

Neste ponto do processo de medição, a **Planilha Processamento V**, além de apresentar o gráfico das velocidades em função das distâncias, mostra, por meio de tabelas, um resumo dos cálculos executados para obter estas velocidades.

A seguir, conforme apresentado na **Figura 110**, são descritas as quatro tabelas da planilha:

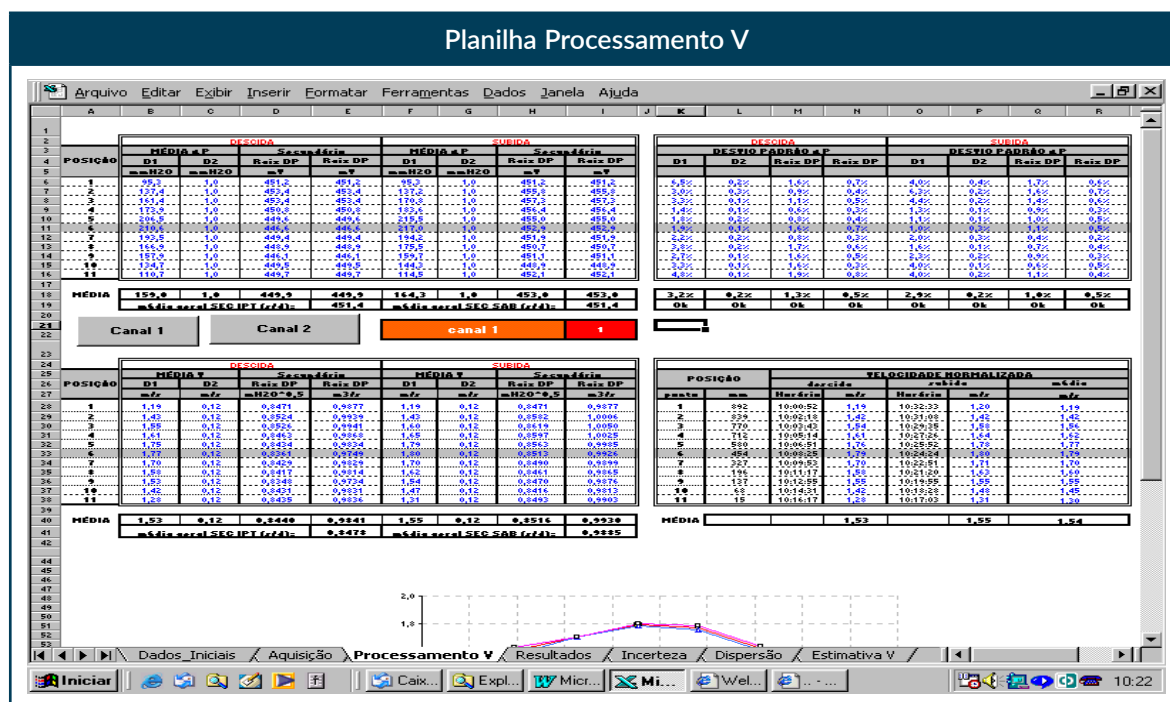


Figura 110. Preenchimento da Planilha Processamento V.

A primeira tabela, no canto superior esquerdo, apresenta dados que vieram diretamente da linha **média** da **Planilha Aquisição**. A **Figura 111** mostra essa tabela.

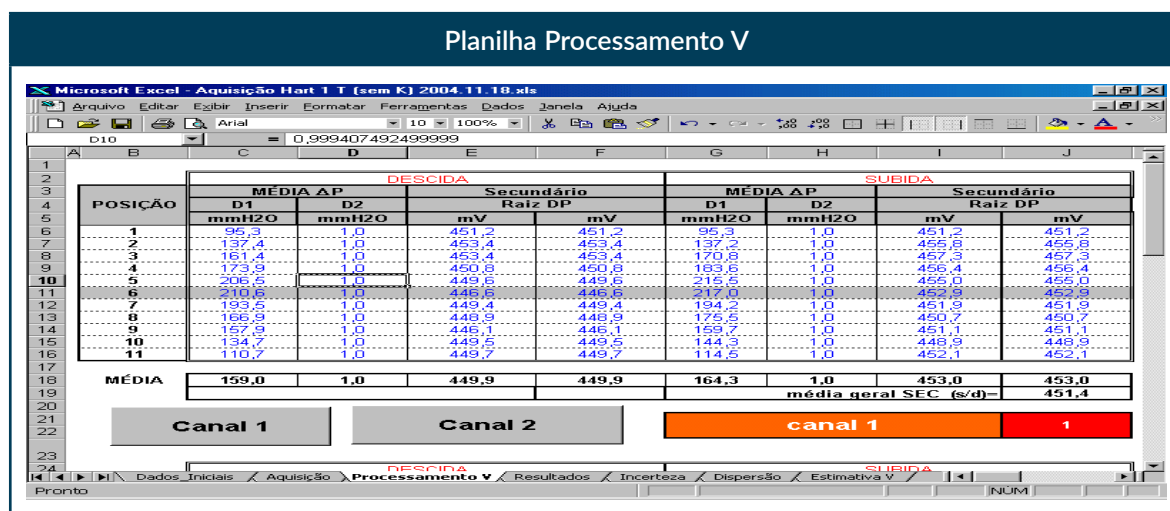


Figura 111. Primeira tabela da Planilha Processamento V.

Cada linha corresponde a uma das onze posições de medição que está dividida em duas áreas denominadas **DESCIDA** e **SUBIDA**, onde estão, respectivamente, os dados adquiridos nos percursos de inserção e de extração do tubo de Pitot.

Cada área, de **DESCIDA** e de **SUBIDA**, é dividida em outras áreas denominadas **MÉDIA DP** e **Secundário**. A área **MÉDIA DP** apresenta os resultados das medições dos transdutores de pressão diferencial **D1** e **D2** e, na área **Secundário**, é apresentado o valor do sinal da tensão elétrica (mV) equivalente à saída de 4-20 mA do elemento secundário do medidor em calibração.

A segunda tabela no canto superior direito da **Planilha Processamento V** também apresenta dados que vieram diretamente da linha média da **Planilha Aquisição**. A **Figura 112** mostra essa tabela.

DESCIDA				SUBIDA			
DESVIO PADRÃO ΔP		Secundário		DESVIO PADRÃO ΔP		Secundário	
D1	D2	Raiz DP		D1	D2	Raiz DP	
6,5%	0,2%	1,6%	0,7%	4,0%	0,4%	1,7%	0,6%
3,0%	0,3%	0,9%	0,4%	6,3%	0,2%	1,6%	0,7%
3,3%	0,1%	1,1%	0,5%	4,4%	0,2%	1,4%	0,6%
1,4%	0,1%	0,6%	0,3%	1,3%	0,1%	0,9%	0,3%
1,8%	0,2%	0,8%	0,4%	1,1%	0,1%	1,0%	0,5%
1,9%	0,1%	1,6%	0,7%	1,0%	0,3%	1,1%	0,5%
2,2%	0,2%	0,8%	0,3%	2,0%	0,3%	0,4%	0,2%
3,8%	0,2%	1,7%	0,6%	1,6%	0,1%	0,7%	0,4%
2,7%	0,1%	1,6%	0,5%	2,3%	0,2%	0,9%	0,3%
3,3%	0,1%	1,6%	0,3%	4,0%	0,1%	0,6%	0,5%
4,8%	0,1%	1,9%	0,8%	4,0%	0,2%	1,1%	0,4%
3,2%	0,2%	1,3%	0,5%	2,9%	0,2%	1,0%	0,5%
Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok	Ok

Figura 112. Segunda tabela da **Planilha Processamento V**.

Como na tabela anterior, cada linha corresponde a uma posição de medição que está dividida em duas áreas **DESCIDA** e **SUBIDA**, onde estão os dados adquiridos nos processos de varredura das velocidades do escoamento com o tubo de Pitot.

Cada área **DESCIDA** e **SUBIDA** é dividida em outras áreas chamadas **DESVIO PADRÃO ΔP** e **Secundário**. A área **DESVIO PADRÃO ΔP** apresenta o desvio padrão das medidas fornecidas pelos transdutores de pressão **D1** e **D2** e, na área **Secundário**, são apresentados os desvios padrão dos valores dos sinais da tensão elétrica (mV) equivalentes à saída de 4-20 mA do elemento secundário do medidor em calibração.

Nas duas linhas inferiores aparecem as médias dos desvios padrão nas onze medições e um verificador que confere se a média de cada desvio padrão apresentado é menor que 5 %. Este verificador é útil para identificar pontos com resultados de medição duvidosos.

A terceira tabela da **Planilha Processamento V**, localizada no canto inferior esquerdo, da mesma maneira que as outras tabelas, está dividida em **DESCIDA** e **SUBIDA** e linhas correspondentes às posições de medição. A **Figura 113** mostra essa tabela.

Planilha Processamento V									
Microsoft Excel - Aquisição Hart 1 T (sem K) 2004.11.18.xls									
Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda									
G44 Arial 10 100%									
A B C D E F G H I J									
23									
24									
25									
26									
27									
28									
29									
30									
31									
32									
33									
34									
35									
36									
37									
38									
39									
40									
41									
42									
43									
44									
45									
46									
Pronto									

Figura 113. Terceira tabela da Planilha Processamento V.

As áreas **DESCIDA** e **SUBIDA** são divididas em outras áreas denominadas **MÉDIA V** e **Secundário**. A área **MÉDIA V** apresenta as velocidades calculadas a partir das medidas fornecidas pelos transdutores de pressão **D1** e **D2**. A área **Secundário** apresenta a raiz do diferencial de pressão do medidor por diferencial de pressão e a vazão do medidor. No caso de medidores eletromagnéticos, onde se lê a raiz do diferencial de pressão do medidor, será apresentada a vazão indicada pelo medidor testado. Estes valores de vazão indicada, serão repetidos na coluna subsequente.

Finalmente, na quarta tabela da **Planilha Processamento V** aparecem as velocidades normalizadas em relação às vazões médias de **DESCIDA** e de **SUBIDA** junto com os horários de início da aquisição e a posição do ponto extremo do tubo de Pitot. Na última coluna tem-se a **VELOCIDADE NORMALIZADA** em relação à vazão média durante a calibração. A **Figura 114** mostra essa tabela.

Planilha Processamento V									
Microsoft Excel - Aquisição Hart 1 T (sem K) 2004.11.18.xls									
Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda									
G44 Arial 10 100%									
K L M N O P Q R S T									
23									
24									
25									
26									
27									
28									
29									
30									
31									
32									
33									
34									
35									
36									
37									
38									
39									
40									
41									
42									
43									
44									
45									
46									
Pronto									

Figura 114. Quarta tabela da Planilha Processamento V.

5.4.2.5 Correção de medidas

Existem situações nas quais a medição da velocidade do escoamento fornece um valor duvidoso que pode ter sido gerado por problemas diversos como, por exemplo, o posicionamento incorreto do tubo de Pitot no ponto, a existência de perturbações no escoamento ou a presença de bolhas de ar no escoamento etc. Esses tipos de problemas podem ser identificados por meio de uma análise do gráfico da planilha de processamento, como mostrado na **Figura 115**, ou por meio do verificador dos desvios padrão indicado na **Figura 112**.

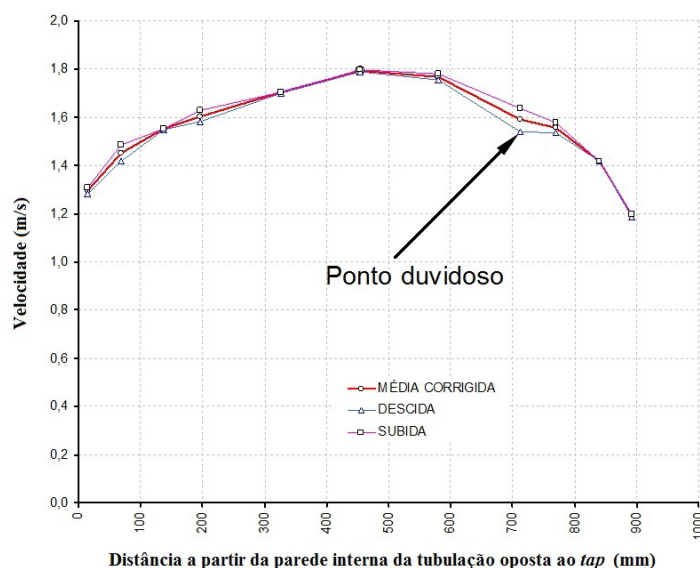


Figura 115. Gráfico com indicação de uma medida de velocidade duvidosa.

Deve-se identificar o ponto que é duvidoso, neste caso o ponto 4 da sequência de descida (4d) e seguir o seguinte procedimento:

Na **Planilha Aquisição** inserir nas janelas acima do botão **Repetir Dados do Ponto acima** o número do ponto e a sequência, se de descida (d) ou subida (s), conforme mostrado na **Figura 116**.

Posicionar o tubo de Pitot na posição desejada. Aguardar de 10 a 15 segundos para estabilizar a velocidade e iniciar a aquisição de dados.

Ao completar as 30 ou 40 aquisições, a planilha de pitometria para de adquirir dados.

Clicar no botão **Repetir Dados** do ponto acima.

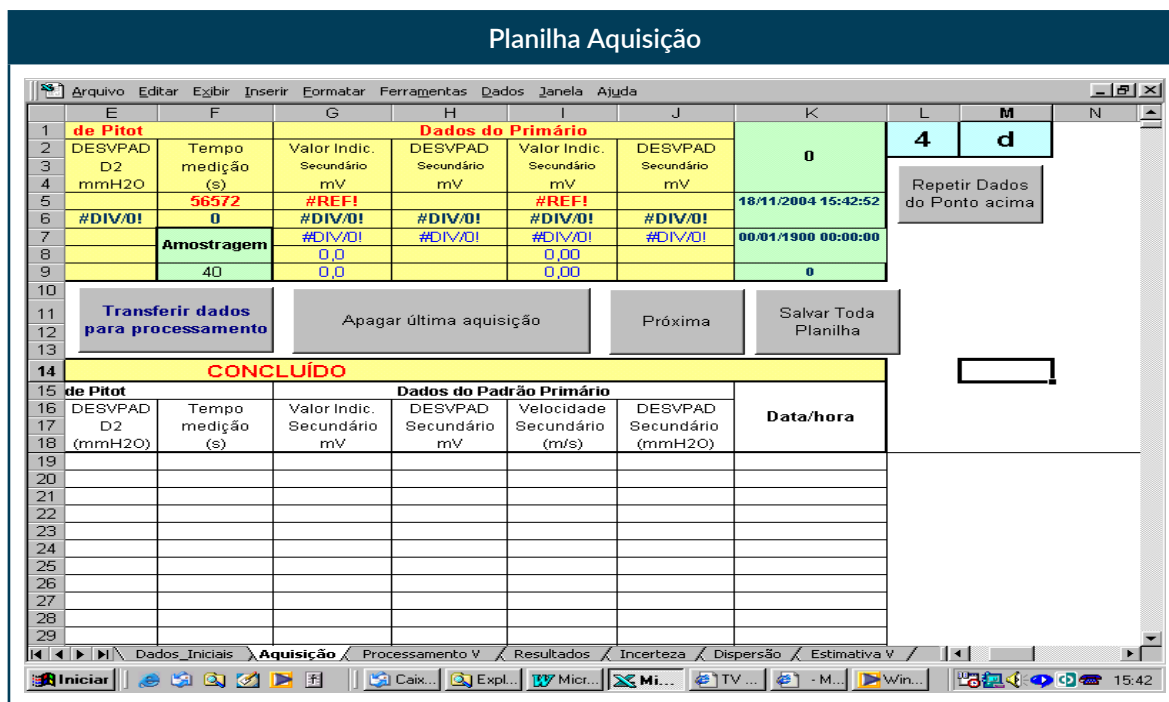


Figura 116. Repetição das medições em um ponto específico na Planilha Aquisição.

Automaticamente, os novos dados referentes ao ponto 4 da sequência de descida são substituídos na **Planilha Processamento V**.

5.4.2.6 Planilha Processamento H

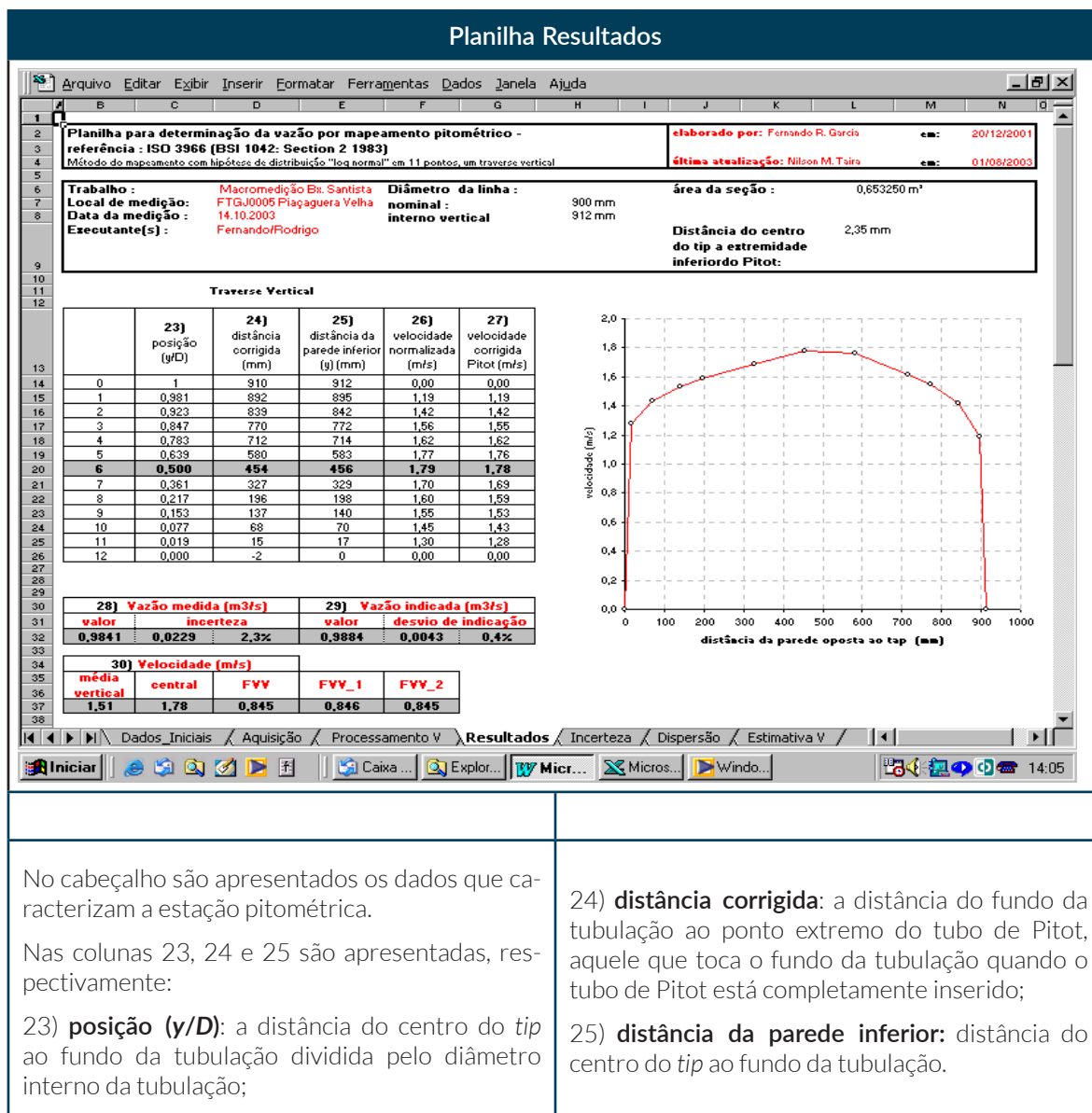
Conforme descrito no **Item 3.4** e na **Figura 17**, existe a possibilidade de utilização de uma planilha de pitometria com mapeamento em dois *traverses*, neste caso, denominados por **V** (Vertical) e **H** (Horizontal). Para realização do mapeamento **H**, deve-se seguir as mesmas recomendações descritas no **itens 5.4.2.1** até **5.4.2.5**.

5.4.2.7 Sequência completa de medições

Após a realização das correções necessárias como descrito no **Item 5.4.2.5**, a sequência de medições descrita no **Item 5.4.2.3** deve ser repetida para cada uma das vazões escolhidas no módulo **Escolha das Vazões**, conforme descrito no fluxograma da **Figura 91**.

5.5 Análise dos resultados

Ao final desse processo, para cada vazão medida, serão obtidos os resultados que são apresentados na **Planilha Resultados** conforme mostrado nas **Figuras 117** e **118** a seguir.



No cabeçalho são apresentados os dados que caracterizam a estação pitométrica.

Nas colunas 23, 24 e 25 são apresentadas, respectivamente:

23) **posição (y/D)**: a distância do centro do *tip* ao fundo da tubulação dividida pelo diâmetro interno da tubulação;

24) **distância corrigida**: a distância do fundo da tubulação ao ponto extremo do tubo de Pitot, aquele que toca o fundo da tubulação quando o tubo de Pitot está completamente inserido;

25) **distância da parede inferior**: distância do centro do *tip* ao fundo da tubulação.

Figura 117. Planilha Resultados.

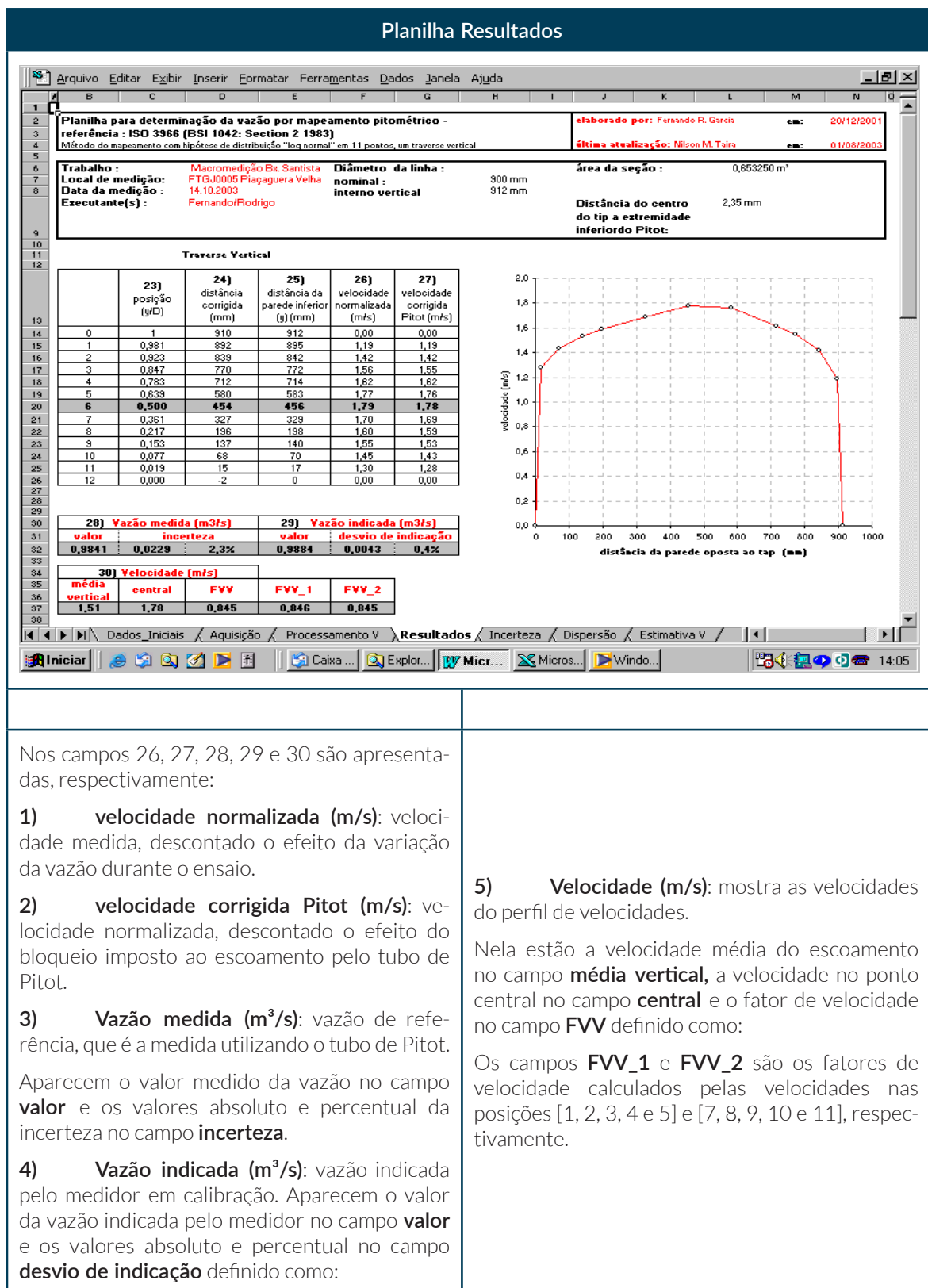


Figura 118. Planilha Resultados (cont.).

5.6 Observações sobre a aplicação da técnica de pitometria

Um fator importante a ser observado é o tempo despendido no processo de determinação da vazão de água por meio da técnica de pitometria, no qual, para cada vazão de operação, são gastos cerca de 40 a 50 minutos para completar o levantamento completo do perfil de velocidades do escoamento, com uma repetição das medições. Este tempo é relativamente longo e, muitas vezes, é impossível garantir que a vazão no conduto onde se encontra instalado o macromedidor permaneça constante. Nesses casos, o sistema desenvolvido pelo IPT permite a correção satisfatória desse problema por meio da utilização do *Fator de Velocidade (FV)*, conforme descrito no Item 3.5 deste Manual.

O uso da planilha de pitometria não exime o usuário da necessidade de realizar uma análise crítica das instalações hidráulicas onde as medições foram realizadas, das condições de medição e dos resultados obtidos. Com efeito, a utilização dos resultados obtidos em uma medição, para quaisquer fins, é de exclusiva responsabilidade do usuário.

A técnica de pitometria apresentada neste manual se aplica essencialmente à medição de vazão de água em condutos de dimensões apropriadas, normalmente superiores a 200 mm (8 polegadas) de diâmetro. O **Item 6** deste Manual aborda o caso da calibração de medidores de vazão de água em condutos com diâmetros menores que 200 mm utilizando a técnica de pitometria.

6-CASOS ESPECIAIS

Este item do manual trata da calibração por meio da técnica de pitometria de medidores de vazão de água não abordados até então no documento que são os casos dos medidores que não apresentam sinal de saída e dos medidores de pequenos diâmetros.

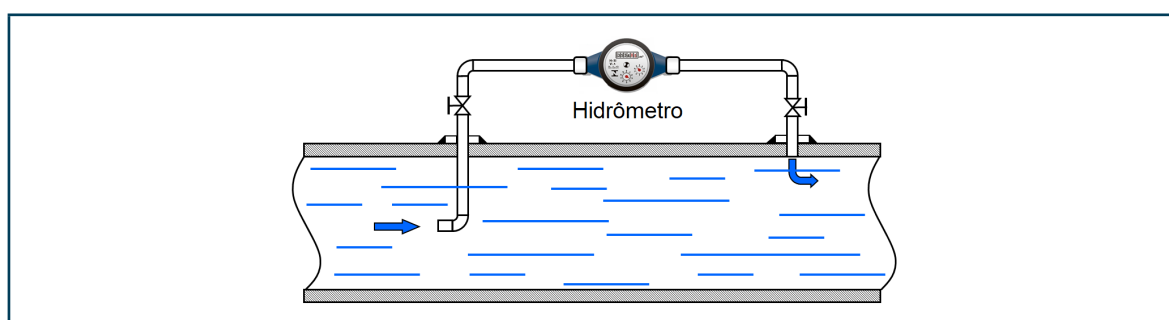
6.1 Calibração de medidores de vazão de água sem sinal de saída (medidores proporcionais – *Shunt* e *Woltmann*)

A medição de vazão proporcional é uma alternativa simples e barata que algumas empresas de saneamento utilizam para registrar no campo ou na Central de Operação, a informação da vazão passante em grandes adutoras, vazão essa, traduzida ou correlacionada por meio de uma pequena vazão desviada da adutora principal. Normalmente, a medição da vazão desviada é feita com a utilização de um medidor de água de pequenas dimensões, também conhecido como medidor *Shunt*, por onde circula a pequena parcela da vazão de água que representará a vazão principal.

Seu princípio de medição baseia-se na proporcionalidade existente entre a quantidade de água que atravessa uma tubulação principal e a vazão que atravessa uma derivação onde existe instalado o medidor de pequena capacidade.

Este tipo de medidor consiste comumente de um hidrômetro velocimétrico (ou outro tipo de medidor de vazão), normalmente de vazão máxima de 3 m³/h, instalado em um *by-pass* que desvia uma parcela da vazão total a ser medida. A totalização do volume de água que passa pelo hidrômetro deve ser multiplicada por um fator de proporcionalidade *K* para a determinação da vazão total de água passante pela adutora.

O fator de proporcionalidade *K* deverá ser determinado por meio de uma calibração por comparação com um medidor de referência. A **Figura 119** ilustra um tipo de medidor *Shunt*.



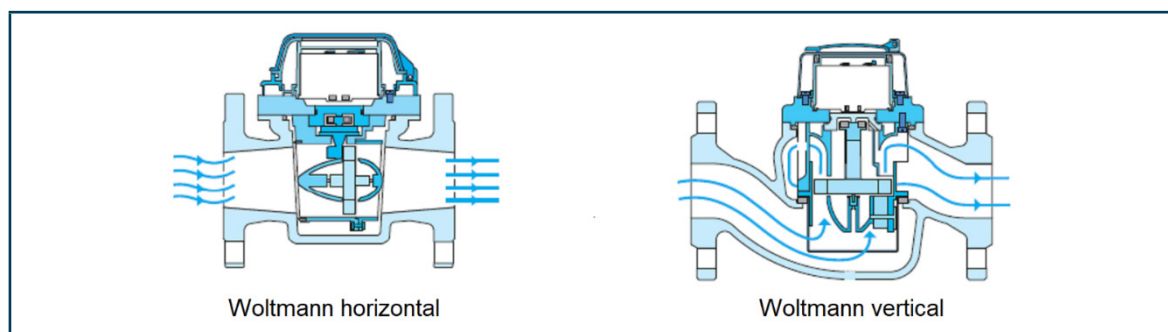
Fonte: IPT

Figura 119. Exemplo de tipo de medidor proporcional ou *Shunt*.

Obviamente, o medidor proporcional ou *Shunt* é uma alternativa de medição de vazão de água que apresenta custo reduzido se comparado com a maioria das tecnologias disponíveis no mercado. Porém, ele apresenta como característica metrológica a baixa confiabilidade das medidas (incertezas de medida elevadas) e a necessidade de calibrações periódicas mais frequentes. Dessa forma, a sua aplicação destina-se mais

a um monitoramento ou acompanhamento da vazão de água na adutora do que a uma medição em si.

Por sua vez, os medidores do tipo Woltmann são macromedidores totalizadores de volume de água do tipo turbina caracterizados pela orientação do eixo da turbina, podendo ser, então, um medidor do tipo Woltmann horizontal ou vertical. A **Figura 120** ilustra esses dois medidores do tipo Woltmann.



Fonte: <https://www.researchgate.net/publication/283045689>

Figura 120. Ilustração de medidores de água do tipo Woltmann.

6.1.1 Calibração de medidores proporcionais (*Shunt*)

A metodologia utilizada para a calibração de medidores proporcionais ou *Shunt* consiste na determinação do fator de proporcionalidade K que é obtido pela relação entre a vazão de referência medida pelo medidor padrão (Q_R) instalado na adutora e a vazão medida pelo hidrômetro velocimétrico proporcional (Q_S), conforme a **Equação (9)**.

$$K = \frac{Q_R}{Q_S} \quad (9)$$

A vazão de referência (Q_R) é determinada por meio da utilização de um medidor padrão de vazão, por exemplo, um sistema de medição por tubo de Pitot do tipo Cole ou por outro tipo de medidor de vazão que forneça medidas com a rastreabilidade e a confiabilidade necessárias. A vazão medida pelo hidrômetro velocimétrico (Q_S) é obtida pela relação entre o volume totalizado no hidrômetro (V_H) e o tempo de medição (Δt), conforme a **Equação (10)**.

$$Q_S = \frac{V_H}{\Delta t} \quad (10)$$

Considerando que os medidores de vazão do tipo hidrômetro tendem a apresentar desempenhos metrológicos não lineares ao longo das suas faixas de operação, normalmente, o fator de proporcionalidade K é determinado, sempre que possível, para um número representativo de vazões diferentes dentro da faixa de operação do medidor.

Ainda, segundo dados de bibliografia, para a obtenção de medidas de vazão com incertezas inferiores a 5 % com a utilização dos medidores proporcionais, a relação

entre as vazões máxima e mínima de operação no ponto de medição não deve ultrapassar o valor de 3. Assim, esse tipo de medidor de água não deveria ser instalado em tubulações cujas vazões possam variar demasiadamente em relação à amplitude operacional. A alternativa para essa limitação é a utilização de outro tipo de medidor de água que apresente um maior intervalo de medição, a exemplo do medidor do tipo eletromagnético.

6.1.2 Calibração de medidores do tipo Woltmann

A vazão de água medida pelo hidrômetro do tipo Woltmann é determinada da mesma forma que a vazão no medidor proporcional, ou seja, pela relação entre o volume totalizado no hidrômetro Woltmann (V_w) e o tempo de medição (Δt), conforme a **Equação (11)**.

$$Q_w = \frac{V_w}{\Delta t} \quad (11)$$

A sua calibração é realizada com o intuito de se determinar o erro de medida apresentado pelo medidor na vazão de operação do ponto, conforme a **Equação (12)**.

$$\text{Erro de medida (\%)} = 100 \cdot \left[\frac{Q_w}{Q_R} - 1 \right] \quad (12)$$

Da mesma forma que no caso da calibração de medidores proporcionais ou *Shunt*, a vazão de referência (Q_R) é determinada por meio da utilização de um medidor padrão de vazão, por exemplo, um sistema de medição por tubo de Pitot do tipo Cole ou por outro tipo de medidor de vazão que forneça medidas com a rastreabilidade e a confiabilidade necessárias.

Deve-se salientar que durante a calibração dos medidores proporcionais ou *Shunt* e dos medidores Woltmann, a vazão ajustada no ponto específico de calibração deve permanecer constante. O ajuste da vazão de calibração poderá ser feito por meio de atuação em válvulas de controle, combinação de bombas hidráulicas ou atuação no variador de frequência do motor quando houver.

6.1.3 Avaliação de dados de calibração

A título de ilustração, na **Figura 121** são apresentados resultados reais de calibrações de quatro medidores proporcionais ou *Shunt* utilizando-se sistemas de medição de vazão por tubos de Pitot e de Venturi como padrão.

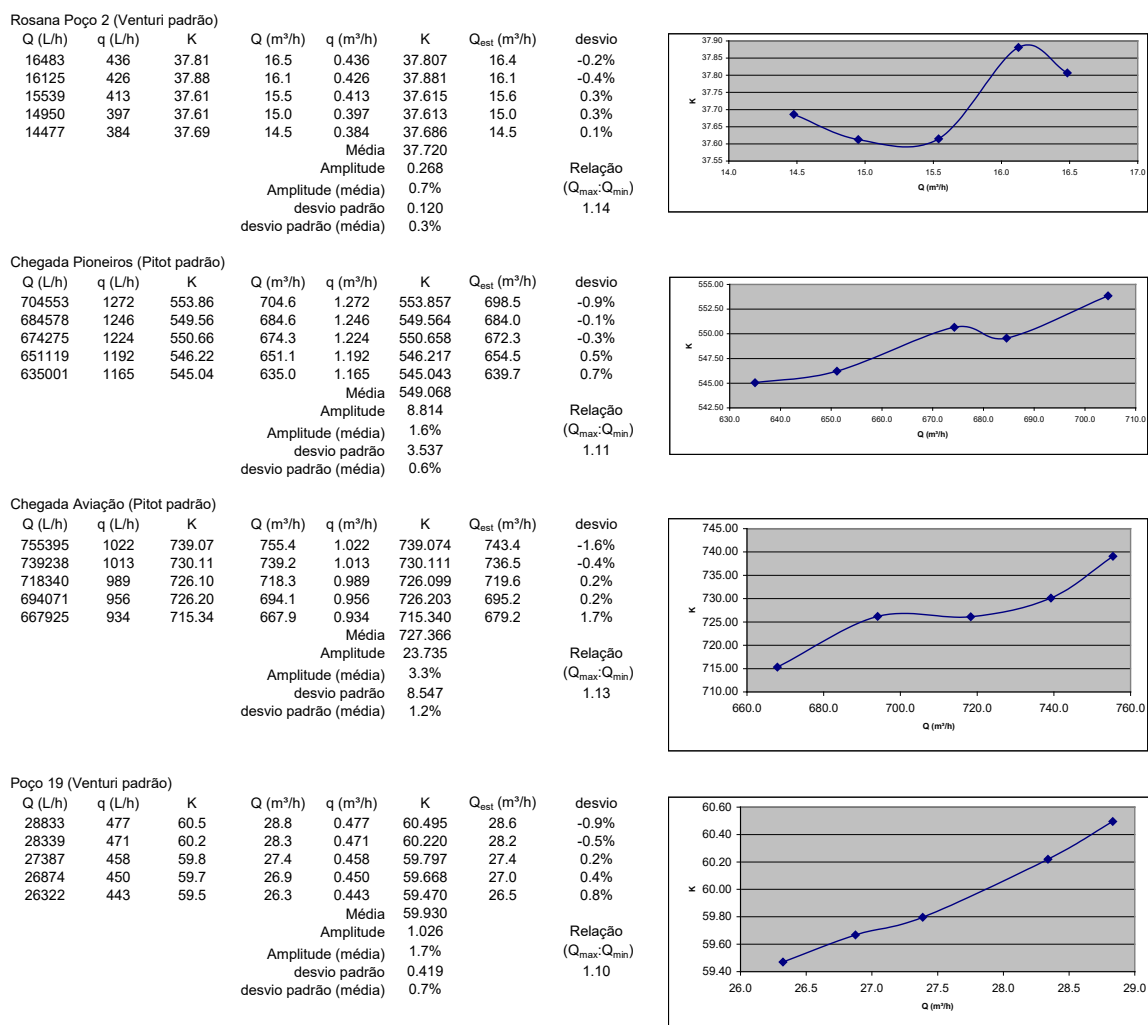


Figura 121. Resultados de calibrações de medidores proporcionais *Shunt* utilizando tubos de Pitot e de Venturi como padrão.

Com base nos dados reais de calibrações de medidores proporcionais apresentados na **Figura 121**, pode-se observar que, nesses casos, as amplitudes de vazão de calibração (Q_{\max}/Q_{\min}) atingidas durante essas medições foram bem estreitas, variando entre 1,10 e 1,14.

Com relação à utilização de tubos de Venturi na calibração tanto de medidores proporcionais quanto de medidores Woltmann, deve-se observar que a instalação em série com um tubo de Venturi pode provocar uma perda de carga no escoamento que impede a calibração no ponto de operação da linha diminuindo a vazão, principalmente no caso em que o ponto de medição operar com a válvula totalmente aberta.

Outro cuidado importante a ser tomado quanto da utilização de um tubo de Venturi é no sentido de se eliminar todos os eventuais vazamentos de água existentes nas conexões utilizadas para instalação do medidor. Vazamentos entre o padrão (Venturi) e o medidor a ser calibrado inviabilizam, do ponto de vista metrológico, a confiabilidade dos resultados da calibração.

Uma opção para a calibração destes medidores é o uso do tubo de Pitot posicionado no centro da tubulação. A vazão é calculada a partir da relação entre o *Fator de Velocidade* (FV) obtido por meio de um mapeamento do perfil de velocidades do escoamento.

mento na linha, a velocidade medida no centro do conduto (V_c) e a área da seção transversal (S) da estação pitométrica.

6.1.4 Uso da planilha de pitometria para medidor proporcional ou Woltmann

Conforme apresentado na **Figura 122**, foram realizadas adaptações na planilha de pitometria original visando a sua utilização para a calibração de medidores proporcionais.

Planilha Aquisição									
DADOS INICIAIS DO PONTO DE MEDIÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO									
1) Trabalho :	Macromedição Sabesp				5) Diâmetro nominal :	300 mm			
2) Local de medição:					6) Diâmetro Interno :	302 mm			
3) Data da medição :					7) L: Distância do centro do tip à extremidade inferior do tubo de Pitot	2,4 mm			
4) Executante(s) :									
8) Tubo de Pitot	Tag:				vertical			lado A	
9) Equações de calibração					10) Canais		11) Valores		
transdutores de pressão		D1	D2		D1		pressão		
DP(mmca)=(DPind+b)*a	9.1) coef. b=	-0,6314	-0,6314		D2		pressão		
	9.2) coef. a=	0,9993	0,9993		Secundário Testado		Dataloger		
9.3) Incerteza (mmH2O)		0,802	0,802		-		Dataloger		
9.4) fator de abrangência		2,2	2,2						
12) Medidor Primário:	eletromagnético				16) Tubo de Pitot				
Q (m³/s)=((mV - b)/a)*Qmax	coef. a=	400,00			C	K (Pitot)	incerteza		
	coef. b=	100,00	Pitot		0,8720	3,8653	0,0080		
13) Qmax (m³/s)	0,250								
14) Diretório:	C:\cimar\Meus documentos\1								
15) FV proporcional	1,1660 m³/s/mH2O ^{1/2}								
Incerteza Incrustação	0,003				17) A Posição 1 é atingida?	Sim		491	
Incerteza Leitura de Posição	0,001								
Aceitar									
Pitot no centro?	Sim				Medidor?	Proporcional		Nº de vazões	6

Figura 122. Planilha de pitometria aplicável à calibração de medidores proporcionais.

Para o uso correto da planilha modificada, devem ser seguidos os passos seguintes:

- Para se determinar o FV do local de medição, deve-se seguir o procedimento normal de pitometria.
- Após o processo pitométrico, o tubo de Pitot deverá ser instalado na posição central e deverá ser selecionada a opção “Pitot no Centro? = sim” na pasta “Dados_Iniciais”.
- Deverá também ser selecionada a opção “Medidor? = Proporcional” na pasta “Dados_Iniciais”.
- Caso seja um medidor Woltmann a ser calibrado, assinalar a opção “Medidor? = Woltmann” na pasta “Dados_Iniciais”.

- Deverá ser selecionado o número de vazões que serão medidas por meio da opção “Nº de vazões?” na pasta “Dados_Iniciais”. O número máximo de vazões é seis.
- O botão “Aceitar” deverá ser acionado.

IMPORTANTE:

- Neste procedimento, é utilizado um único *Fator de Velocidade FV* para as vazões selecionadas, caso seja necessário um *FV* diferente para cada vazão, na opção “Nº de vazões?” Deverá ser selecionada a opção = 1 e deverá ser feito um ensaio pitométrico para cada vazão específica, utilizando-se planilhas diferentes.
- Caso não seja necessário realizar um ensaio pitométrico para a determinação do *FV* do local de medição. O *FV* existente no local deverá ser informado na célula “FV_{proporcional} =”.

11		19) Mapeamento com tubo de Pitot				20) Tempo		21) Dados do Medidor Testado				00:01:07		7		d			
2		ΔP Pitot	DESVPAD	ΔP Pitot	DESVPAD	Tempo	Valor Indic.	DESVPAD	Valor Indic.	DESVPAD									
0		D1	D1	D2	D2	medição	Secundário	Secundário	Secundário	Secundário									
30		mmH2O	mmH2O	mmH2O	mmH2O	(s)	mV	mV	mV	mV									
atual		#REF!		#REF!		-124	#REF!		#REF!		01/08/2006 09:55:25				Repetir Dados do Ponto acima				
média		106,10	1,37%	106,09	1,78%	65	205,98	1,33%	205,98	1,33%									
veloc.		1,26		1,26		18)		Tempo			26/05/2005 11:04:12				Apagar dados de Processamento V				
máximo		108,9		110,5		Amostragem	210,6	Proporcional	210,60	Volume									
mínimo		103,2		102,4		30	200,5	1,0	200,54	2,00	65								
Iniciando Aquisição		Parar		Limpar Dados		Transferir dados para processamento		Apagar última aquisição		Próxima		Salvar Toda Planilha		22) Vazão indicada pelo medidor testado					
CONCLUIDO																#REF!			
Mapeamento com tubo de Pitot																Dados do Padrão Primário		Data/hora	
P	ΔP Pit. Ideal	DESVPAD	ΔP Pit. Cole	DESVPAD	Tempo	Valor Indic.	DESVPAD	Velocidade	DESVPAD										
O	D1	D1	D2	D2	medição	Secundário	Secundário	Secundário	Secundário										
	(mmH2O)	(mmH2O)	(mmH2O)	(mmH2O)	(s)	mV	mV	(m/s)	(mmH2O)										
*	104,27		104,08		396,49	209,30		209,30		20/05/2005 11:04:09									
1	106,41		105,04		3	208,76		208,76		20/05/2005 11:04:12									
2	106,86		107,08		4	206,12		206,12		20/05/2005 11:04:13									
3	106,85		106,35		6	206,92		206,92		20/05/2005 11:04:15									
4	104,66		104,21		8	206,92		206,92		20/05/2005 11:04:17									
5	104,48		105,32		10	201,33		201,33		20/05/2005 11:04:19									
6	103,16		102,44		12	200,54		200,54		20/05/2005 11:04:21									
7	105,79		104,91		15	201,57		201,57		20/05/2005 11:04:24									
8	105,07		106,50		16	204,36		204,36		20/05/2005 11:04:25									
9	107,89		110,01		18	206,88		206,88		20/05/2005 11:04:27									
10	106,90		107,03		21	209,18		209,18		20/05/2005 11:04:30									
11	108,54		108,13		22	204,50		204,50		20/05/2005 11:04:31									
12	106,82		106,75		25	205,05		205,05		20/05/2005 11:04:34									
13	104,37		105,96		28	206,04		206,04		20/05/2005 11:04:37									
15	104,47		104,23		31	204,24		204,24		20/05/2005 11:04:40									

Figura 123. Planilha de pitometria aplicável à calibração de medidores proporcionais (cont.).

- Após o ensaio pitométrico com o Pitot na posição central, deve-se selecionar uma quantidade de amostras suficientemente grande de forma que o tempo da aquisição seja maior ou igual ao tempo de monitoramento do volume com o medidor proporcional.
- Para cada vazão, deverá ser coletado um grupo de dados de pressão diferencial. Ao final do tempo determinado para a leitura do volume pelo medidor proporcional, deve-se parar a aquisição.
- No campo “Tempo Proporcional” ou “Tempo Woltmann” deverá ser colocado o tempo de verificação do volume do medidor Proporcional / Woltmann.
- No campo “Volume Proporcional” ou “Volume Woltmann” deverá ser colocado o volume registrado pelo medidor Proporcional / Woltmann.

A tecla “Transferir Dados para Processamento” deverá ser acionada.

Planilha Aquisição									
Teste Proporcional									
Vazão	Média DP		mV	Medição Proporcional		Vazão Pitot	Fator KM Proporcional	Média Desvio Padrão	
	D1	D2		Tempo	Volume			D1	D2
	mmH2O	mmH2O		s	m3				
1						#NUM!	#NUM!		
2						#NUM!	#NUM!		
3						#NUM!	#NUM!		
4						#NUM!	#NUM!		
5						#NUM!	#NUM!		
6						#NUM!	#NUM!		
Usar o FV do traverse obtido no ensaio?				Não		Transdutor		D1	
Apagar Dados									

Figura 124. Planilha de pitometria aplicável à calibração de medidores proporcionais (cont.).

- Para cada vazão, será adicionada uma nova linha na pasta “Processamento_Proportional”.
- Caso não seja necessário um novo ensaio para a determinação de um novo FV para o local de medição, selecionar a opção “não” referente ao campo “Usar o FV do traverse obtido no ensaio?”.
- Na opção “Transdutor”, selecionar o tipo de transdutor (D0 ou D1) que melhor se ajusta à faixa de pressão.

Planilha Aquisição

Planilha para determinação da vazão por mapeamento pitométrico - referência : ISO 3966 (BSI 1042: Section 2 1983) Método do mapeamento com hipótese de distribuição "log normal" em 11 pontos, um traverse vertical				elaborado por: Fernando R. Garcia em: 20/12/2001 última atualização: Nilson M. Taira em: 1/8/2003	
Trabalho : Macromedição Sabesp Local de medição: 0 Data da medição : 00/jan/1900 Executante(s) : 0		Diâmetro da linha : nominal : 300 mm interno vertical medido 302 mm		área da seção : 0,071631 m² Distância do centro do tip a extremidade inferior do Pitot: 2,35 mm	

	23) posição (y/D)	24) distância corrigida (mm)	25) distância da parede inferior (y) (mm)	26) velocidade normalizada (m/s)	27) velocidade corrigida Pitot (m/s)
0	1	300	302	0,00	0,00
1	0,981	294	296	#NUM!	#NUM!
2	0,923	276	279	#NUM!	#NUM!
3	0,847	253	256	#NUM!	#NUM!
4	0,783	234	236	#NUM!	#NUM!
5	0,639	191	193	#NUM!	#NUM!
6	0,500	149	151	#NUM!	#NUM!
7	0,361	107	109	#NUM!	#NUM!
8	0,217	63	66	#NUM!	#NUM!
9	0,153	44	46	#NUM!	#NUM!
10	0,077	21	23	#NUM!	#NUM!
11	0,019	3	6	#NUM!	#NUM!
12	0,000	-2	0	0,00	0,00

28) Vazão medida (m³/s)			29) Vazão indicada (m³/s)		
valor	incerteza		valor	desvio de indicação	
#NUM!	#DIV/0!	#DIV/0!	-0,0625	#NUM!	#NUM!

30) Velocidade (m/s)				
média vertical	central	FVV	FVV_1	FVV_2
#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!

Vazão Pitot (m³/s)						
31) Fator Proporcional	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!	#NUM!

Figura 125. Planilha de pitometria aplicável à calibração de medidores proporcionais (cont.).

- A pasta “Resultados” fornecerá os dados do ensaio pitométrico e, também, os valores de vazão obtidos com o uso do tubo Pitot do tipo Cole e o fator de proporcionalidade K (Fator Proporcional) para cada vazão de calibração.
- No caso do medidor do tipo Woltmann, serão fornecidos apenas os valores de desvio de indicação.

6.2 Calibração de medidores de vazão de água diâmetros menores que 200 mm

A avaliação do efeito do bloqueio causado no escoamento de água pela introdução do tubo de Pitot do tipo Cole durante a medição do perfil de velocidades para tubos de diâmetros inferiores a 200 mm necessitava de validação experimental que ainda não havia sido realizada.

Com este objetivo, o IPT realizou estudos de modo a comprovar a efetiva possibilidade do uso do mapeamento pitométrico para condutos com esses diâmetros menores. Foram testados três métodos de mapeamento utilizando tubo de Pitot do tipo Cole clássico, conforme apresentado na **Tabela 7**.

Tabela 7. Métodos de mapeamento do perfil de velocidades do escoamento em condutos forçados para tubos de diâmetros menores que 200 mm.

Tubo de Pitot	Mapeamento
Cole	Log linear Manual de Pitometria No centro da tubulação

Os métodos de mapeamento do perfil de velocidades utilizados foram:

- *Log-linear* com 10 pontos de medição por diâmetro de varredura, conforme a norma NBR ISO 3966 [11].
- Método proposto por Edward Cole (*Manual de Pitometria*) no qual as velocidades são medidas nos décimos de diâmetro e nos pontos próximos à parede.
- Além dos métodos anteriores, foi utilizada a medição de velocidade no centro da tubulação para o cálculo da vazão, utilizando o *Fator de Velocidade* (FV) teórico-experimental para tubos lisos.

Uma dificuldade no mapeamento de perfil de velocidades, tanto no método *Log-linear* quanto no método proposto por Cole, é a medição da velocidade nos dois pontos próximos da geratriz superior da tubulação que, dependendo do diâmetro, não podem ser alcançados pelo tubo de Pitot. Nesses casos, já era prevista no *Manual de Pitometria* a extrapolação do perfil de velocidades para determinar as velocidades nos pontos onde o tubo de Pitot não alcança.

Para a tubulação utilizada, foram interpolados os dois pontos próximos da geratriz superior da tubulação tanto para o método *Log-linear* quanto para o método proposto por Cole.

O mapeamento do perfil de velocidades para analisar os métodos de mapeamento foi feito utilizando-se uma tubulação de aço carbono de DN 100 ($D_{int} = 103 \text{ mm}$) onde o tubo de Pitot do tipo Cole alcançava a cota “y” máxima em 87 mm, conforme a **Figura 126**.

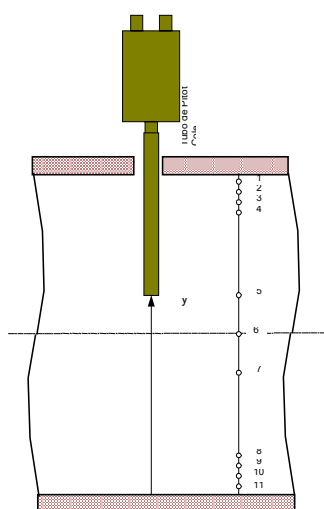


Figura 126. Posicionamento do tubo de Pitot ao longo do diâmetro de uma tubulação tomando como referência a geratriz inferior.

Nos ensaios, foi utilizado como medidor de vazão de referência um medidor eletromagnético de DN 100 (4 polegadas) instalado em série com a estação pitométrica. Nas **Tabelas 9 e 10** são apresentados os resultados dos ensaios realizados. As vazões dos ensaios correspondem às velocidades médias apresentadas na **Tabela 8**.

Tabela 8. Velocidades médias e vazões adotadas para teste.

Vazão (m³/s)	Velocidade média (m/s)
0,0042	0,5
0,0078	1,0
0,0119	1,5

Tabela 9. Resultados do ensaio com tubo de Pitot do tipo Cole e método *Log Linear*.

Vazão (m³/s)	Incerteza de medida		Vazão (m³/s)	Erro de medida	
	(m³/s)	(%)		(m³/s)	(%)
0,0041	0,0002	4,9	0,0042	-0,0001	-3,4
0,0075	0,0004	5,3	0,0077	-0,0002	-2,6
0,0119	0,0006	5,0	0,0120	-0,0001	-1,2

Tabela 10. Resultados do ensaio com tubo de Pitot do tipo Cole e método de Cole (método convencional do *Manual de Pitometria*).

Vazão (m³/s)	Incerteza de medida		Vazão (m³/s)	Erro de medida	
	(m³/s)	(%)		(m³/s)	(%)
0,0042	0,0002	4,8	0,0042	0,0000	-1,1
0,0079	0,0005	6,3	0,0081	-0,0002	-2,4
0,0117	0,0007	6,0	0,0118	-0,0001	-1,2

Nas **Tabelas 9 e 10** pode-se ver que os mapeamentos obtidos utilizando o método de Cole (método convencional do *Manual de Pitometria*) apresentaram os melhores resultados para o tubo de Pitot do tipo Cole. Porém, o método *Log Linear* para tubo de Pitot do tipo Cole também apresentou erros de medida da mesma ordem que o caso anterior.

Outro modelo estudado foi a medição de vazão medindo-se a velocidade do escoamento no centro da tubulação e adotando-se o *Fator de Velocidade* média (FV) teórico – experimental para tubos lisos cujo perfil de velocidades é dado pela **Equação (13)**.

$$\left(\frac{u}{V_c}\right)^N = \frac{y}{R} \quad (13)$$

Onde: u : velocidade do escoamento de água no ponto y (m/s);
 V_c : velocidade do escoamento de água no centro da tubulação (m/s);
 y : posição do tubo de Pitot conforme **Figura 126** (m);
 R : raio interno da tubulação (m);
 N : expoente.

Para este perfil, o *Fator de Velocidade média* FV é dado pelas **Equação (14)** e **Equação (15)**:

$$FV = \frac{\bar{V}}{V_c} \quad (14)$$

$$FV = \frac{2 \cdot N^2}{(N + 1) \cdot (2N + 1)} \quad (15)$$

onde: \bar{V} : velocidade média do escoamento (m/s)

Pode-se calcular a vazão na tubulação por meio da **Equação (16)**:

$$Q = FV \cdot V_c \cdot A \quad (16)$$

Onde: A : área da seção transversal interna da tubulação
 FV : *Fator de Velocidade*

A **Tabela 11** apresenta os resultados das medições de vazão realizadas com um tubo de Pitot do tipo Cole posicionado no centro da tubulação de 100 mm de diâmetro.

Tabela 11. Resultados das medições realizadas com tubo de Pitot do tipo Cole instalado no centro da tubulação.

Vazão (m³/s)	Incerteza de medida		Vazão (m³/s)	Erro de medida	
	(m³/s)	(%)		(m³/s)	(%)
0,0041	0,0002	4,9	0,0042	-0,0001	-3,4
0,0075	0,0004	5,3	0,0077	-0,0002	-2,6
0,0118	0,0006	5,0	0,0120	-0,0002	-2,0

Pode-se observar que os desvios encontrados foram da mesma ordem que os outros mapeamentos realizados com o tubo de Pitot do tipo Cole, apresentados anteriormente.

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que, para tubos com diâmetros menores que 200 mm:

- é possível a medição de vazão com tubo de Pitot do tipo Cole e mapeamento de perfil de velocidades pelo método *Log Linear* e pelo método proposto por Cole (método convencional do *Manual de Pitometria*);
- a metodologia pode ser aplicada nestes casos desde que sejam consideradas incertezas de medida da ordem de 5 % a 6 % da vazão de referência medida com o tubo de Pitot do tipo Cole;
- a medição de vazão com o tubo de Pitot posicionado no centro do duto é uma alternativa para tubos sem rugosidade excessiva e *taps* instalados com um trecho reto a montante de pelo menos 20 diâmetros de comprimento e a jusante de 5 diâmetros, conforme recomendações da norma NBR ISO 3966 [11].

Observação: nos tubos de diâmetros menores que 200 mm, a projeção do *tap* para o interior do escoamento pode prejudicar o posicionamento do tubo de Pitot e uma maneira de atenuar esse efeito é a instalação do *tap* com o auxílio de um colar de tomada, conforme apresentado na **Figura 127**.



Figura 127. Exemplos de tipos de colar de tomada metálico e em PEAD.

7-ESTIMATIVA DE INCERTEZAS DE MEDIDA NA PITOMETRIA

Sempre que realizamos a medição da vazão de um fluido, o resultado obtido é simplesmente a melhor estimativa que pode ser obtida do valor da grandeza sob medição. Na prática, o valor efetivo da grandeza medida pode ser ligeiramente maior ou menor do que esse valor, sendo que o parâmetro denominado “incerteza de medida” caracteriza a faixa de valores dentro da qual se espera que o valor efetivo da grandeza medida se encontre, de acordo com um nível da confiança especificado.

Nesse sentido, o objetivo deste item do Manual é apresentar, por meio de um exemplo, as orientações gerais para a estimativa da incerteza de medida associada à vazão medida por meio da técnica de pitometria.

Não é intenção deste documento esgotar o assunto sobre incertezas de medida, uma vez que o domínio completo do tema requer a aquisição de uma formação aprofundada e abrangente sobre os fundamentos envolvidos na matéria, o que não é absolutamente o propósito deste Manual.

7.1 Introdução

O VIM-Vocabulário Internacional de Metrologia define o termo *incerteza de medida* como o “parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas”.

Incertezas de medida podem provir de várias fontes: da própria definição do mensurando, do objeto ou modelo físico da medição, do modelo matemático que procura representar o modelo físico, dos instrumentos de medição utilizados, do ambiente em que a medição está sendo realizada, do desempenho do operador, do procedimento de medição, além de muitas outras origens. Cada uma dessas fontes de incerteza contribui, em maior ou menor grau, para a incerteza final associada ao resultado da medição.

Os valores atribuídos a cada uma dessas fontes de incerteza podem ser calculados com base na análise estatística de um conjunto de medidas ou utilizando outros tipos de informação disponíveis sobre o processo de medição como certificados de calibração e manuais técnicos dos instrumentos utilizados, normas, livros, artigos e relatórios técnicos, informações de especialistas e outras.

O uso das boas práticas metrológicas, por um metrologista capacitado e treinado, com base em um procedimento validado e utilizando instrumentos de medição calibrados com resultados rastreáveis e confiáveis, tendem a reduzir o valor da incerteza associada à medida.

A avaliação da incerteza obtida com a utilização de um instrumento ou sistema de medição pode ser uma tarefa cansativa e longa, e certamente exige esforços no sentido de se entender e aplicar os princípios envolvidos no cálculo da incerteza. Entretanto, sem isso as medições realizadas tornam-se contestáveis e, infelizmente, muitas pessoas preocupam-se apenas em medir e rapidamente obter um resultado sem, contudo, realizar uma análise criteriosa da própria medição e estimar a incerteza associada aos resultados. As consequências disso traduzem-se em perdas de confiabi-

lidade e de recursos, podendo inclusive ser muito maiores do que os custos decorrentes da execução de uma análise inicial correta e criteriosa das incertezas envolvidas na medição.

7.2 Referências sobre estimativa de incertezas de medida

A seguir, são apresentadas referências que orientam os métodos de medição e cálculo de incertezas de medida e que podem ser aplicadas na avaliação de resultados de medição de vazão de água por meio da técnica de pitometria:

- ABNT ISO/IEC Guia 99, *Vocabulário Internacional de Metrologia – Conceitos fundamentais e gerais e termos associados* (VIM).
- ABNT NBR ISO 3966 - *Medição de vazão em condutos fechados – Método velocimétrico utilizando tubos de Pitot estático*.
- ABNT NBR ISO 5168 - *Medição de vazão de fluidos - Procedimento para avaliação de incertezas*.
- Guia *Avaliação de dados de medição: guia para a expressão de incerteza de medição* – GUM, Duque de Caxias, RJ: Inmetro/Cicma/Sepin, 2012.
- ISO 7066-2 - *Assessment of uncertainty in calibration and use of flow measurement devices – Part 2: Non-linear calibration relationships*.

Tópicos não abordados no presente documento deverão ser objetos de consulta nesses documentos de referência ou em outras normas, guias e materiais técnicos aplicáveis.

7.3 Definições sobre estimativa de incertezas de medida

A terminologia utilizada neste documento está em conformidade com a norma ABNT ISO/IEC Guia 99 e o GUM.

Mensurando: grandeza que se pretende medir.

Incerteza de medição (sic): parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas.

Fontes de incerteza: parâmetros que, devido ao desconhecimento exato de seus valores ou comportamentos, implicam uma carência de conhecimento sobre o valor do mensurando.

Incerteza-padrão: incerteza de medição expressa na forma de um desvio-padrão.

Incerteza-padrão combinada: incerteza-padrão obtida ao se utilizarem incertezas-padrão individuais associadas às grandezas de entrada num modelo de medição. Normalmente, representada por $u_c(y)$.

Incerteza de medição expandida (sic): produto de uma incerteza-padrão combinada por um fator maior do que o número um. Normalmente, representada por $U = k u_c(y)$.

Fator de abrangência: número maior do que um pelo qual uma incerteza-padrão combinada é multiplicada para se obter uma incerteza de medição expandida. Normalmente, representado pelo símbolo k .

Coefficiente de sensibilidade: variação na estimativa da saída y produzida por uma mudança unitária na estimativa de entrada x_i . Normalmente, representado pelo símbolo c_i .

Graus de liberdade: número de observações independentes sob uma dada restrição. Normalmente, representado pelo símbolo ν .

Nível da confiança: valor da probabilidade associada com um intervalo de confiança ou um intervalo de abrangência estatístico. Obs.: Na maioria das atividades relacionadas à medição de vazão de água, normalmente, se utiliza um intervalo de confiança de 95 %.

Grandeza de entrada em um modelo de medição: grandeza que deve ser medida, ou grandeza cujo valor pode ser obtido de outro modo, para calcular um valor medido de um mensurando.

Grandeza de saída em um modelo de medição: grandeza cujo valor medido é calculado utilizando-se os valores das grandezas de entrada num modelo de medição.

Grandeza de influência: grandeza que, numa medição direta, não afeta a grandeza efetivamente medida, mas afeta a relação entre a indicação e o resultado de medição.

7.4 Cálculo da vazão medida por meio da técnica de pitometria

A medição da vazão utilizando o tubo de Pitot Cole é feita a partir dos resultados obtidos com o mapeamento do perfil de velocidades em um ou dois diâmetros de uma seção transversal da tubulação onde se encontra instalada a chamada estação pitométrica.

Por meio da velocidade média, calculada a partir das velocidades locais medidas no mapeamento do perfil de velocidades, e do diâmetro interno da tubulação, é possível obter o valor da vazão de água.

As velocidades locais do escoamento em cada um dos pontos do diâmetro de medição definidos pela distribuição *log-linear* descrita na norma ABNT NBR ISO 3966, são determinadas de acordo com o seguinte modelo matemático dado pela **Equação (17)**:

$$V_i = C_d \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_i}{\rho}} \quad (17)$$

onde:

V_i	: velocidade local do escoamento no i -ésimo ponto da distribuição <i>log-linear</i> ;
C_d	: coeficiente de calibração tubo de Pitot Cole, obtido na calibração da sonda;
ΔP_i	: pressão diferencial no tubo de Pitot para o i -ésimo ponto da distribuição <i>log-linear</i> ;
ρ	: massa específica da água.

Para condutos de grande diâmetro (por ex.: maiores do que 500 mm), é realizada a medição da velocidade local (V_i) em cada um dos dez pontos previstos na distribuição *log-linear*. Com base nessas velocidades locais, é calculada a velocidade média (\bar{V}) para o perfil levantado para um diâmetro de medição da seção transversal da tubulação. Ou seja:

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^{10} V_i}{10} \quad (18)$$

Para condutos de diâmetros menores, a distribuição *log-linear* prevê um número de seis pontos de medição por diâmetro.

A área da seção transversal do conduto na estação pitométrica é calculada a partir da medida do diâmetro interno da tubulação. No caso da medição realizada por meio do mapeamento do perfil de velocidades em dois diâmetros, a medida do diâmetro interno será o valor médio entre os diâmetros medidos para cada uma das direções.

$$A_t = \frac{\pi \cdot D_i^2}{4} \quad (19)$$

onde:

- A_t : área da seção transversal do conduto onde se encontra instalada a estação pitométrica (m^2/s);
- D_i : diâmetro interno da tubulação medido no eixo de mapeamento m^2/s . No caso de mapeamento em dois diâmetros, o valor do diâmetro interno a ser utilizado será a média dos dois diâmetros internos medidos.

Finalmente, a vazão de água é calculada por meio do produto da velocidade média pela área da seção transversal:

$$Q = \bar{V} \cdot A_t \quad (20)$$

onde:

- Q : vazão de água (m^3/s);
- \bar{V} : velocidade média calculada por meio do mapeamento do perfil de velocidades (m/s). Para o caso de mapeamento dos perfis de velocidade em dois diâmetros, a velocidade média considerada para o cálculo da vazão será a média das velocidades médias determinadas para cada um dos diâmetros mapeados.

7.5 Estimativa da incerteza de medida

A incerteza-padrão $u(x_i)$ associada a uma grandeza específica x_i pode ser estimada a partir do conhecimento do processo de medição e dos seus modelos físico e matemático.

A incerteza expandida (U) associada ao valor do mensurando é normalmente expressa como a dimensão da semi-amplitude da faixa de valores dentro da qual se espera que ocorra o valor verdadeiro da medida, de acordo com um nível da confiança

estabelecido. Ela pode ser obtida a partir do produto da incerteza-padrão combinada $u_c(y)$ associada ao valor do mensurando pelo fator de abrangência (k), conforme a seguinte equação:

$$Q = \bar{V} \cdot A_t \quad (21)$$

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (22)$$

A incerteza-padrão combinada $u_c(y)$ é obtida a partir do modelo matemático (f) do processo de medição cujo mensurando (y) é expresso por meio de uma equação do tipo:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (23)$$

onde:

$x_i, i = 1, 2, \dots, n$: grandezas de entrada que afetam o valor do mensurando.

A partir desta equação, a incerteza-padrão combinada $u_c(y)$ é definida como:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n [c_i]^2 \cdot u^2(x_i) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 \cdot u^2(x_i) \quad (24)$$

onde :

c_i : coeficiente de sensibilidade da grandeza de entrada x_i ;

$u(x_i)$: incerteza-padrão associada à grandeza de entrada x_i .

A incerteza-padrão $u(x_i)$ é quantificada como o desvio padrão da grandeza de entrada x_i .

O exemplo de estimativa de incerteza apresentada a seguir segue as orientações do GUM e das normas ABNT NBR ISO 5168 e ISO 7066-2. Tratando-se de uma medição de vazão por meio do mapeamento do perfil de velocidades utilizando um tubo de Pitot do tipo Cole, é feita referência ao Anexo G da norma ABNT NBR ISO 3966.

7.5.1 Fontes de incerteza

Uma das etapas mais importantes do procedimento de cálculo de incertezas de medida é a identificação das possíveis fontes de incerteza que impactam o resultado de uma medição. Para isso, é importante o conhecimento do processo metrológico em análise, de suas grandezas de entrada, das grandezas de influência e da grandeza de saída.

No caso da medição de vazão por meio da técnica de pitometria, as fontes de incerteza resultam do processo metrológico que depende da própria dinâmica do escoamento de água no conduto, do procedimento de medição, da instrumentação utilizada e da técnica de integração das velocidades locais.

Dessa forma, tomando-se como base as equações (1), (2), (3) e (4) que representam respectivamente os modelos de cálculo da velocidade pontual do escoamento,

da velocidade média, da área da seção transversal e da vazão de água, as seguintes potenciais fontes de incerteza apresentadas na **Tabela 12** podem ser consideradas.

Tabela 12. Fontes de incerteza na medição de vazão por mapeamento pitométrico

Mensurando	Fontes de incerteza
Velocidade local (V_i)	Incerteza associada ao coeficiente de calibração do tubo de Pitot
	Incerteza associada ao valor da pressão diferencial
	Incerteza associada ao valor da massa específica da água
	Incerteza decorrente das flutuações de velocidade do escoamento
	Incerteza decorrente do gradiente de velocidades próximo aos <i>tips</i>
	Incerteza associada à correção devido ao efeito de bloqueio do Pitot
	Incerteza decorrente da inclinação do tubo de Pitot
Resultado:	Incerteza-padrão combinada associada à velocidade local (V_i)
Velocidade média (\bar{V})	Incerteza-padrão combinada associada à velocidade local (V_i)
	Incerteza associada à deformação do perfil de velocidades
Resultado:	Incerteza-padrão combinada associada à velocidade média (\bar{V})
Vazão (Q)	Incerteza-padrão combinada associada à velocidade média (\bar{V})
	Incerteza decorrente do posicionamento incorreto do tubo de Pitot
	Incerteza associada ao valor da área da seção transversal
	Incerteza associada ao número insuficiente de pontos de medição
Resultado:	Incerteza-padrão combinada associada à vazão (Q) de água

NOTA: É importante esclarecer que outras fontes de incerteza, além das relacionadas na Tabela 1, podem estar presentes em uma medição de vazão por meio da técnica de pitometria, a depender de cada situação em particular. Saber identificar e quantificar essas fontes é resultado do conhecimento e da experiência do metrologista responsável pela medição.

As estimativas das incertezas-padrão associadas a cada uma das fontes de incerteza apresentadas na Tabela 1, seguem o exemplo descrito no Anexo G da norma ABNT NBR ISO 3966.

7.5.2 Quantificação das fontes de incerteza

A seguir, são apresentados valores típicos de incerteza-padrão associada a cada uma das fontes mencionadas anteriormente.

7.5.2.1 Incertezas que afetam a medida da velocidade local (V_i)

- Incerteza associada ao valor do coeficiente de calibração do tubo de Pitot.* O tubo de Pitot utilizado em uma medição deve possuir um certificado de ca-

libração emitido por um laboratório de vazão, preferencialmente acreditado pela Cgcre do Inmetro. Via de regra, essa incerteza é fornecida no certificado de calibração do tubo de Pitot na forma de uma incerteza expandida $U(C_d)$ acompanhado de um fator de abrangência $k \cong 2$. Dessa forma, a incerteza-padrão associada ao valor do coeficiente de calibração do tubo de Pitot será $u(C_d) = U(C_d) / k$. Admitindo-se que a incerteza expandida declarada no certificado seja de 1,0 % do valor do coeficiente de calibração, resulta: $u(C_d) = 0,5\%$

- b. *Incerteza associada ao valor da pressão diferencial.* Considera-se a incerteza da medida da pressão diferencial, como a incerteza decorrente da calibração dos transdutores de pressão constante do certificado ou estimada pelo executante da calibração. Para medições realizadas com um transdutor de pressão de boa qualidade, pode-se assumir que essa incerteza-padrão seja da ordem de 0,4 % da pressão diferencial medida.
- c. *Incerteza associada ao valor da massa específica da água.* Considerando-se que o valor da massa específica da água é calculado a partir da sua temperatura, é razoável assumir uma incerteza-padrão de 0,3 % da massa específica calculada.
- d. *Incerteza decorrente das flutuações de velocidade do escoamento.* Essa incerteza é de origem aleatória e o seu melhor estimador é o desvio padrão da média das n leituras efetuadas para cada ponto. Assim, essa incerteza é dada por:

$$u(f) = \frac{s(V_i)}{\sqrt{n}}$$

onde:

$s(V_i)$: desvio padrão das medidas de velocidade local durante o intervalo de medição;
 \sqrt{n} : número de medidas realizadas durante o intervalo de medição.

Quando os valores dos desvios padrão da média obtidos nos vários pontos do *traverse* forem muito diferentes, por segurança, recomenda-se adotar o de maior dispersão.

Naturalmente, a magnitude dessa fonte de incerteza depende de cada situação específica. No exemplo da norma, o valor assumido para essa fonte de incerteza é de 0,1 % da velocidade local.

- e. *Incerteza decorrente do gradiente de velocidades próximo aos tips.* Essa incerteza está associada à variação da velocidade do escoamento decorrente da deformação das linhas de corrente na região próxima aos *tips* do tubo de Pitot. De acordo com o item 12.2 da norma ABNT NBR ISO 3966, para um tubo de Pitot cujo diâmetro (d) seja de aproximadamente 1/50 do diâmetro (D) do conduto, a incerteza-padrão devido a esse efeito pode ser admitida como sendo da ordem de 0,15 % da velocidade local.

- f. *Incerteza associada à correção devido ao efeito de bloqueio do Pitot.* De acordo com a norma, os erros de medida causados pelo efeito de bloqueio imposto ao escoamento de água pelo tubo de Pitot são sempre positivos. No exemplo do Anexo G da norma ISO 3966 é apresentada uma estimativa desta incerteza como sendo da ordem de 0,25 % da velocidade medida. No entanto, considerando-se que o tubo de Pitot do tipo Cole ocupa uma área maior do que a dos tubos de Pitot estático mencionados na referida norma, é prudente adotar um valor de 0,50 % para essa incerteza.
- g. *Incerteza decorrente da inclinação do tubo de Pitot em relação à direção do escoamento.* Ao posicionar o tubo de Pitot no escoamento, é possível que este não resulte perfeitamente alinhado em relação à direção do escoamento, o que pode provocar um erro de medida na pressão diferencial e, conseqüentemente, na velocidade local. Esse erro tende a aumentar com o aumento do ângulo de inclinação e depende do tubo de Pitot utilizado. Será sempre positivo enquanto a inclinação permanecer dentro dos limites indicados no item 6.1.3 da norma. As indicações para a estimativa dessa incerteza são fornecidas no Anexo A da norma. De acordo com o item A.2, para um desvio de orientação de 3°, a incerteza-padrão decorrente desse efeito pode ser de 0,15 % da velocidade local.

Considerando as fontes de incerteza relacionadas anteriormente e seus valores estimados, a incerteza-padrão combinada associada à medida da velocidade local será determinada por meio da seguinte expressão:

$$\frac{u_c(V_i)}{V_i} = \sqrt{(0,005)^2 + \left(\frac{0,004}{2}\right)^2 + \left(\frac{0,003}{2}\right)^2 + (0,001)^2 + (0,0015)^2 + (0,005)^2 + (0,0015)^2}$$

ou

$$\frac{u_c(V_i)}{V_i} \approx 0,0079$$

7.5.2.2 Incertezas que afetam o valor da velocidade média (\bar{V})

- a. *Incerteza-padrão combinada associada à velocidade local (V_i).* Resulta da estimativa feita em 7.5.2.1.
- b. *Incerteza associada à deformação do perfil de velocidades.* A estimativa dessa fonte de incerteza se baseia na dispersão dos desvios entre as velocidades pontuais medidas ao longo do raio em cada quadrante e as velocidades obtidas por meio da equação de ajuste segundo a distribuição *log-linear*, pelo método dos mínimos quadrados. Obviamente, a magnitude dessa fonte de incerteza depende das condições do escoamento estabelecido na seção de medição específica e, assim, deveria ser determinado caso a caso. A título de exemplo, pode-se admitir que a incerteza-padrão associada a esta fonte seja de 0,25 % do valor da velocidade local:

Portanto, a incerteza-padrão combinada associada à medida da velocidade média (\bar{V}) é dada por:

$$\frac{u_c(\bar{V})}{\bar{V}} = \sqrt{(0,0079)^2 + (0,0025)^2} = 0,0083$$

7.5.2.3 Incertezas que afetam o valor da vazão (Q)

- a. *Incerteza-padrão combinada associada à velocidade média (\bar{V}). Resulta da estimativa feita em 7.5.2.2.*

$$\frac{u_c(\bar{V})}{\bar{V}} = 0,0083$$

- b. *Incerteza-padrão decorrente do posicionamento incorreto do tubo de Pitot. Durante o processo de mapeamento pitométrico das velocidades do escoamento, é possível que o tubo de Pitot do tipo Cole acabe sendo posicionado incorretamente no ponto de medição prescrito na distribuição *log-linear*. Caso as tolerâncias de posicionamento fornecidas no item 4.4.1 da norma sejam seguidas, é razoável assumir:*

$$\frac{u(\text{posic})}{Q} = 0,0005$$

- c. *Incerteza-padrão associada ao valor da área da seção transversal. A área da seção transversal do conduto é calculada a partir da medida do seu diâmetro, operação feita em campo com a utilização de um calibre e uma escala metálica. Para se estimar esta incerteza, pode-se, por exemplo, assumir uma distribuição de probabilidades retangular com uma amplitude de 3 mm na medida do diâmetro do conduto, considerando nesse valor as incertezas associadas à calibração da régua, ao seu uso em campo e as incertezas devidas a possíveis deformações e incrustações no interior do tubo. Com isso:*

$$\frac{u(A_t)}{A_t} = 0,0035$$

- d. *Incerteza-padrão associada ao número insuficiente de pontos de medição. Caso as condições de escoamento fornecidas na norma ABNT NBR ISO 3966 sejam seguidas, pode-se assumir:*

$$\frac{u(n)}{Q} = 0,001$$

Portanto, a incerteza-padrão combinada associada à medida da vazão (Q) é dada por:

$$\frac{u_c(Q)}{Q} = \sqrt{(0,0083)^2 + (0,0005)^2 + (0,0035)^2 + (0,001)^2} = 0,0091$$

E, considerando que a vazão deve ser determinada com um nível da confiança de 95 %, resulta:

$$U(Q) = 2 \cdot u_c(Q)$$

ou seja:

$$U(Q) \cong 1,8 \% \text{ da vazão medida}$$

O valor final obtido demonstra que a incerteza expandida associada ao resultado de uma medida de vazão por meio da técnica de pitometria pode resultar inferior a 2 % da vazão medida, desde que as condições do escoamento e da medição sejam adequadas, a medição seja realizada em conformidade com a determinações da norma ABNT NBR ISO 3966 e sejam consideradas e avaliadas apropriadamente todas as fontes de incerteza relevantes.

REFERÊNCIAS

- [1] AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. History of Water Measurement and Water Meters. In: *Water Meters – Selection, Installation, Testing, and Maintenance*. AWWA, 2001
- [2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 3966: Medição de vazão em condutos fechados: Método velocimétrico utilizando tubos de Pitot estático. Rio de Janeiro, 2013.
- [3] BRITISH STANDARD. BS 1042- 2.1:1983, ISO 3966:1977. Measurement of fluid flow in closed conduits: velocity area methods. method using Pitot static tubes. London, 1983.
- [4] BUSCARINI I.O.; et al. Impact of Pitot tube calibration on the uncertainty of water flow rate measurement. *Journal of Physics: Conference Series*, Gramado (RS), v. 648, issue 1, article id. 012005, 2015.
- [5] DARCY, H. *Recherches experimentales relatives au mouvement de l'eau dans les tuyaux*. Paris: Impr. Impériale, 1857.
- [6] FRANGIPANI, M. *Ensaio Pitométrico*. Brasília: SNSA, 2007 (Guias Práticos: técnicas de operações em sistema de abastecimento de água, v. 2)
- [7] INMETRO. Avaliação de dados de Medição: guia para a expressão de incerteza de medição: GUM 2008. Traduzido de Evaluation of measurement data: guide to the expression of uncertainty in measurement. Rio de Janeiro: INMETRO, 2012
- [8] INMETRO - *Vocabulário Internacional Metrologia*: conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012). Rio de Janeiro: INMETRO, 2012. Tradução do documento International Vocabulary of Metrology – Basic and general concepts and associated terms - JCGM 200:2012. http://www1.ipq.pt/PT/Metrologia/Documents/VIM_IPQ_INMETRO_2012.pdf.
- [9] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. ISO/IEC 61400: wind turbine generator systems – part 12: Wind turbine power performance testing, annex f. 2005

- [10] PITOT, H. Description d'une machine pour mesurer la vitesse des eaux courantes et le sillage des vaisseaux: *In: Histoire de l'Académie royale des sciences avec les mémoires de mathématique et de physique tirés des registres de cette Académie*. Paris, 1732. p. 363–376.
- [11] SANTO G.E.; TAIRA, N.M.; e SANTOS, C. *Comparação da calibração de tubos de Pitot em um túnel de vento, tanque de reboque e tubulação*. Comunicação interna do IPT. São Paulo, 2004.
- [12] TAIRA, N.M.; KAWAKITA, K.; RUIZ, V. Pitometry as a validation tool for water flow measurement in large diameter pipelines. In: International Flow Measurement Conference, 18, Lisbon, 2019. *Proceedings...* 5p.

AUTORIA E REVISÃO

O presente manual foi elaborado pelos seguintes pesquisadores do Centro de Metrologia Mecânica, Elétrica e de Fluidos – CTMetro do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT:

- **Autores:**

Nilson Massami Taira (Diretor do CTMetro)

Kazuto Kawakita (Pesquisador do CTMetro)

- **Revisores pelo IPT:**

Rui Gomez Teixeira de Almeida (Chefe do Laboratório de Vazão do CTMetro)

Valmir Ruiz (Pesquisador do CTMetro)

- **Revisores pela ANA:**

Alan Vaz Lopes (Superintendente de Fiscalização)

Josimar Alves de Oliveira (Coordenador de Segurança de Barragens)

Iracema Freitas (Coordenadora da Superintendência de Fiscalização)

São Paulo, 22 de julho de 2020.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS- -IPT	INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS- -IPT
Centro de Metrologia Mecânica, Elétrica e de Fluidos - CTMetro	Centro de Metrologia Mecânica, Elétrica e de Fluidos - CTMetro
Kazuto Kawakita	Nilson Massami Taira
Engenheiro Mecânico	Engenheiro Mecânico
Pesquisador do CTMetro	Diretor do CTMetro
CREA nº 0601287430 / RE 07236	CREA nº 601861565 / RE 7858



 **ANA**
AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS
E SANEAMENTO BÁSICO

MINISTÉRIO DO
DESENVOLVIMENTO REGIONAL

 **PÁTRIA AMADA
BRASIL**
GOVERNO FEDERAL

ISBN: 978-65-88101-09-4



9 786588 101094

ERRATA

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (BRASIL). **Manual orientativo para calibração de macromedidores de vazão de água por meio da técnica de pitometria**. Brasília: ANA, 2021. 152 p.

No verso da **folha de rosto**:

Onde se lê: “Rubens Silva Telles (Chefe da Seção de Óleo e Gás – CTMetro)”

Leia-se: “Kazuto Kawakita (Pesquisador – CTMetro)”