

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**PROCEDIMENTO ALTERNATIVO PARA
TOTALIZAÇÃO VOLUMÉTRICA
INDIRETA DE ÁGUA BRUTA**

Luiz Celso Braga Pinto

**Campinas, SP
2003**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**PROCEDIMENTO ALTERNATIVO PARA
TOTALIZAÇÃO VOLUMÉTRICA INDIRETA DE
ÁGUA BRUTA**

Luiz Celso Braga Pinto

Orientador: Prof. Dra. Ana Inês Borri Genovez

Tese de Doutorado apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, na área de concentração de Recursos Hídricos.

**Campinas, SP
2003**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

**PROCEDIMENTO ALTERNATIVO PARA TOTALIZAÇÃO
VOLUMÉTRICA INDIRETA DE ÁGUA BRUTA**

Luiz Celso Braga Pinto

Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

**Orientador: Profa. Dra. Ana Inés Borri Genovez
Presidente e Orientador/UNICAMP**

**Profa. Dra. Yvone de Faria Lemos de Lucca
DAEE/EPUSP/FAAP**

**Prof. Dr. Alberto Luiz Francato
FEC/UNICAMP**

**Prof. Dr. José Roberto Bonilha
FEC/UNICAMP**

**Prof. Dr. Paulo Sérgio Franco Barbosa
FEC/UNICAMP**

Campinas, 19 de novembro de 2003

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha mãe, que sempre me auxiliou a enxergar a vida da melhor forma possível.

Agradecimentos

Agradeço aos professores doutores Ana Borri Genovez e José Roberto Bonilha por me acompanharem no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço também à Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos – COGERH, Agência Nacional de Águas – ANA, Grypho Engenharia e DPM Engenharia, que colaboraram, seja de forma direta ou indireta, para a conclusão deste trabalho.

Sumário:

Lista de Figuras	IX
Lista de Tabelas.....	XI
Lista de Símbolos.....	XII
Resumo	XIV
1 – Introdução.....	1
2 – A Experiência Existente na Medição de Vazões e Volumes	5
2.1 – Introdução	5
2.2 – Projetos Piloto com a utilização do sistema horímetro/ultra-som	5
2.2.1 – A Experiência do Ceará	5
2.2.2 – A Experiência de Nebraska.....	7
2.3 – A Utilização de válvulas dispersoras cônicas como dispositivo de medição de vazões.....	8
2.4 – Medidores Proporcionais.....	9
2.5 – Experiências com Válvulas Controladoras de Vazão.....	10
3 – Equipamentos para Medição de Vazões e Volumes	11
3.1 – Introdução	11
3.2 – Ultra-Som.....	11
3.2.1 – Medição Ultra-sônica por tempo de trânsito	14
3.2.2 – Referências Normativas	14
3.2.3 - Definições	15
3.2.3.1 – Método “Diferença de Tempo de Trânsito”	15
3.2.3.2 – Método “Superfície Principal”	15
3.2.3.3 – Método “Frequência de Repetição de Pulsos”	15
3.2.3.4 – Método “Lambda-Locked-Loop”	15
3.2.3.5 - Método “Cruzamento do Zero”	15
3.2.3.6 - Método “Multi-Trajeto”	16
3.2.3.7 - Método “Pulso Simultâneo”	16
3.2.3.8 - Método “Troca de Fase”	16
3.2.3.9 - Medidor de Vazão Ultra-Sônico	16

3.2.3.10 – Integrador de Vazão	16
3.2.3.11 – Transdutor Ultra-Sônico	16
3.2.3.12 – Posicionamento não Intrusivo	17
3.2.3.13 – Tubo de Medição.....	17
3.2.3.14 – Seção de Medição	17
3.2.3.15 – Trajeto Acústico	17
3.2.3.16 – Comprimento do Trajeto.....	17
3.2.3.17 – Comprimento de Interrogação.....	17
3.2.3.18 – Distância de Interrogação	17
3.2.3.19 – Ângulo de Inclinação	17
3.2.3.20 – Ângulo de Fase.....	17
3.2.3.21 – Velocidade de Propagação.....	17
3.2.3.22 – Velocidade do Som	17
3.2.3.23 – Velocidade Média do Fluido ao Longo do Trajeto Acústico	17
3.2.3.24 – Velocidade Média Axial do Fluido.....	17
3.2.3.25 – Fator de Correção de Distribuição de Velocidades.....	19
3.2.3.26 – Pulso Ultra-Sônico	19
3.2.3.27 – Tempo de Trânsito	19
3.2.3.28 – Diferença de Tempo de Trânsito.....	19
3.2.4 – Princípios Gerais de Medição.....	19
3.2.4.1 – Geração dos Sinais Ultra-Sônicos	19
3.2.4.2 – Método do Tempo de Trânsito	21
3.2.4.3 – Calculando a Taxa de Vazão (q_v).....	25
3.2.5 – Tipos de Montagens dos Transdutores Ultra-Sônicos	27
3.2.5.1 – Montagem dos Transdutores	27
3.2.5.2 – Unidade de Controle ou Conversor.....	32
3.2.6 – Incertezas de Medição.....	32
3.2.6.1 – Procedimentos de Cálculo	33
3.2.6.2 – Fatores de Influência.....	35
3.2.7 – Calibração	38
3.2.7.1 – Calibração a Seco.....	38
3.2.7.2 – Calibração de Escoamento.....	40
3.2.7.3 – Calibração de Vazão em Campo	41
3.2.8 - Custo	41
3.3 – Horímetro	42
3.4 – Outros Medidores de Vazão Utilizados para Água Bruta.....	44
3.4.1 – Tipo Turbina de Inserção	45
3.4.2 – Combinações ou Medição Indireta.....	47
3.4.3 – Medidor Proporcional	48
3.4.4 – Medidor Eletromagnético	49
3.4.5 – Medidor Woltman	51
3.5 – Considerações Finais	52
4 – Material e Método.....	53
4.1 – Introdução	53
4.2 – Estudos de Campo	53

4.2.1 – Metodologia dos Estudos de Campo	55
4.3 – Ensaaios em Laboratório.....	59
4.3.1 – Metodologia dos Ensaaios	61
4.3.1.1 – Circuito Fechado	61
4.3.1.2 - Horímetros.....	61
5 – Resultados	62
5.1 – Introdução	62
5.1.1 – Ensaaios em Laboratório	62
5.1.2 – Ensaaios em Campo	64
5.2 - Análise dos Resultados	68
5.3 – Incertezas e Precisão dos Instrumentos e do Conjunto	69
5.3.1 - Exatidão, repetibilidade e reproduzibilidade das medições	69
5.3.2 – Incertezas das medições com os diferentes equipamentos	70
5.3.3 – Análise da Incerteza do Conjunto Ultra-Som/Horímetro em Campo	72
5.3.4 – Incerteza do Conjunto Ultra-Som/Horímetro em Laboratório	75
5.4 – Análise Econômica e de Custos do Conjunto Horímetro/Ultra-Som em Relação a Outras Opções	76
5.5 – Aplicação dos Sistemas de Medição por Horímetros à Resolução Nacional para Sistemas de Medição de Vazão para Usuários de Recursos Hídricos.....	77
6 – Conclusões.....	79
Referências Bibliográficas	81
Bibliografia.....	84
ANEXOS.....	85
Anexo A – Minuta da Resolução da ANA	85
Abstract.....	90

Lista de Figuras

	Página
Figura 1 - Válvula Dispersora Cônica.....	22
Figura 2 – medidor ultra-som portátil e fixo.....	26
Figura 3 – Princípio de funcionamento por tempo de trânsito.....	27
Figura 4 – Princípio de medição utilizando o método “Superfície Principal”.....	29
Figura 5 – Princípio de medição utilizando o método “Cruzamento do Zero”.....	30
Figura 6 – Formas de instalação de medidor de trajeto único.....	32
Figura 7 – Possível projeto de um transdutor piezoelétrico.....	34
Figura 8 – Padrão de projeção medida de um transdutor.....	35
Figura 9 – Fases dos sinais ultra-sônicos a montante e jusante.....	38
Figura 10 – Valor aproximado para k_h em função de Re_D	40
Figura 11 – Tipos de transdutores.....	42
Figura 12 – Montagem trajeto único.....	43
Figura 13 – Instalação multi-trajetos.....	44
Figura 14 – Um dos primeiros wattímetros e medidores de ampére-hora.....	56
Figura 15 – Horímetros mecânicos e digitais.....	57
Figura 16 – Medidor tipo turbina de inserção.....	59
Figura 17 – Medidor tipo turbina de inserção.....	60
Figura 18 – Medidores Proporcionais.....	62
Figura 19 – Medidor Eletromagnético em corte.....	63
Figura 20 – Medidor Eletromagnético tipo inserção.....	64

Figura 21 – Princípio de funcionamento do medidor eletromagnético.....	64
Figura 22 – Medidores tipo Woltman.....	65
Figura 23 – Localização do DIJA e divisão das bacias Hidrográficas do Ceará.....	68
Figura 24 - Instalação típica de horímetros em bombas.....	69
Figura 25 – Esquema da instalação de ensaio do circuito fechado.....	73
Figura 26 – Fotos do circuito fechado de ensaios.....	74
Figura 27 – Esquema da instalação de ensaio dos horímetros.....	74
Figura 28 – Aferição ultra-sônica de sistema de recalque.....	79
Figura 29 – Instalação padrão em caixa de alumínio.....	88
Figura 30 - Lacres para garantir a inviolabilidade do sistema.....	88

Lista de Tabelas

	Página
Tabela 1 – Medidores de Vazão.....	58
Tabela 2 – Segunda Série de Dados de Campo.....	70
Tabela 3 – Segunda Série de Dados de Campo.....	72
Tabela 4 – Ensaio do Circuito Fechado.....	76
Tabela 5 – Ensaio dos Horímetros.....	77
Tabela 6 – Resultados das campanhas de aferição no campo.....	78
Tabela 7 - Comparativo entre as duas séries de aferições em campo com filtro.....	80
Tabela 8 - Comparativo entre as duas séries de aferições em campo sem filtro.....	81
Tabela 9 – Incerteza nas leituras dos horímetros.....	85
Tabela 10 – Análise dos resultados de todas as aferições.....	86
Tabela 11 - Análise dos resultados para sistemas com filtro.....	86
Tabela 12 - Análise dos resultados para sistemas sem filtro.....	87
Tabela 13 – Custos médios dos equipamentos DN 200	90
Tabela 14 – Custos médios dos equipamentos DN 400	90

Lista de Símbolos

Referência	Símbolo	Dimensões	Unidade Correspondente S.I.
Área da seção transversal	A	L^2	m^2
Velocidade de propagação no fluido	c	LT^{-1}	m/s
Velocidade do som no fluido em descanso	c_o	LT^{-1}	m/s
Diâmetro interno do tubo	D	L	m
Distância de interrogação	d	L	m
Incerteza relativa	E	*	-
Incerteza absoluta	e	**	-
Frequência	f	T^{-1}	s^{-1}
Integrador	i	*	-
Fator de correção de distribuição de velocidades	k_h	*	-
Distância calculada	L	L	m
Comprimento do trajeto	L_p	L	m
Integrador	m	*	-
Integradores (1,2,3...)	n	*	-
Taxa de vazão	q_v	L^3T^{-1}	m^3/s
Vazão referente à aferição realizada em novembro de 2001 (Primeira série de dados)	Q_1	L^3T^{-1}	m^3/s
Vazão referente à aferição realizada em maio de 2003 (Segunda série de dados)	Q_2	L^3T^{-1}	m^3/s
Massa específica do fluido	Q	ML^{-3}	kg/m^3
Número de Reynolds (relacionado a D)	Re_D	*	

Referência	Símbolo	Dimensões	Unidade Correspondente S.I.
Tempo de trânsito	t	T	s
Diferença de tempo de trânsito	Δt	T	s
Velocidade local do fluido	v	LT^{-1}	m/s
Velocidade média do fluido no trajeto acústico	$\bar{v}$	V	m/s
Velocidade Média Axial	$\bar{v}_A$	LT^{-1}	m/s
Peso de medição	w_i	*	-
Ângulo de fase	γ	*	rad
Comprimento de onda de uma oscilação ultra-sônica	λ	L	m
Ângulo de inclinação	ϕ	*	rad
Frequência cíclica	ω	T^{-1}	rad.s ⁻¹
Onde: M= massa, L= comprimento, T = tempo * quantidades não dimensionáveis ** a dimensão deste parâmetro é a dimensão da quantidade à qual ele relata			

Subscrições

1	montante
2	jusante

Resumo

Pinto, Luiz Celso Braga. **Procedimento Alternativo para Totalização Volumétrica Indireta de Água Bruta**. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 104 páginas. Tese.

A necessidade de mensuração dos volumes de água bruta captados de fontes hídricas e o lançamento de efluentes são motivos de preocupação imediata, pois tanto o mercado como as instituições nacionais envolvidas no assunto ainda não estão apropriadamente preparadas para tal função. Pelo lado da captação de água bruta, a grande maioria dos medidores e técnicas encontradas no Brasil para a mensuração de vazões e volumes em condutos forçados são especificados para a utilização com água tratada e não se adequam à medição de água bruta. O objetivo deste trabalho é fornecer subsídios para se facilitar e possibilitar a mensuração de volumes e vazões de forma mais econômica e com um nível mínimo de precisão, para ser utilizado principalmente pelas agências e comitês de gestão de recursos hídricos. Desta forma foi feito um estudo em campo e laboratório para testar o uso de horímetro, com aferição por ultra-som em linhas de recalque. Os resultados, em sistemas sem filtros na linha de adução, indicaram um desvio de precisão global da ordem de $\pm 3,9\%$. A utilização de horímetros, portanto, se mostra como uma solução viável tecnicamente e economicamente, visto seu baixo custo de implantação e precisão proporcionada.

Palavras Chave: vazão; volume; ultra-som; horímetro; medição indireta.

1 – Introdução

A criação da Agência Nacional de Águas – ANA em junho de 2000, fato este considerado um grande avanço para a consolidação da gestão dos recursos hídricos no Brasil, juntamente com as conferências mundiais da água de Marrakesh (Marrocos), em 1997, Haia (Holanda), em 2000 e Kyoto (Japão), em março de 2003, criaram uma demanda por ferramentas de gestão de águas que se tornou uma necessidade imediata. (fonte: www.ana.gov.br-2003)

A criação da ANA visa prioritariamente a gestão de forma organizada, racional e integrada. Como toda grande iniciativa, é necessária a estruturação das idéias e aplicações já existentes paralelamente a iniciativas de conhecimento e desbravamento de novos campos na gestão dos recursos hídricos, até recentemente inexploradas. (fonte: www.ana.gov.br)

Para o controle e cobrança dos recursos hídricos, que gerarão recursos para a manutenção da agência e ações de benfeitoria nas bacias que pagam pelo uso da água, é impreterível que os volumes de água envolvidos sejam mensurados, seja por motivos de gestão, seja objetivando a cobrança propriamente dita.

A necessidade de mensuração dos volumes de água bruta captados de fontes hídricas e o lançamento de efluentes nas mesmas são motivos de preocupação imediata para a agência, pois tanto o mercado como as instituições nacionais envolvidas no assunto ainda não estão apropriadamente preparadas para tal função. Cabe lembrar que não se trata de uma necessidade apenas nacional, mas também uma preocupação mundial.

Pelo lado da captação de água bruta, a grande maioria dos medidores e técnicas encontradas no Brasil para a mensuração de vazões e volumes são especificados para a utilização com água tratada e não se adequam à medição de água bruta. O mercado brasileiro seguiu a demanda dos medidores das companhias de saneamento, que sempre se preocuparam em realizar a cobrança para os consumidores finais, seja residencial, comercial ou industrial.

As próprias companhias de saneamento nunca demandaram em grande escala a utilização de medidores para efluentes e esgotos, geralmente cobrando por estes um fator do volume medido na entrada de água fornecida, sendo que o volume estimado para tal é sempre fração ou totalidade do volume mensurado pelo medidor de água tratada.

Com a crescente importância dada ao conhecimento dos volumes captados e lançados, até mesmo para a realização de balanço de demanda bioquímica de oxigênio e outros aspectos qualitativos do recurso hídrico, torna-se imprescindível a adequação dos fabricantes de medidores, institutos de pesquisa, associações (através de adequação e atualização de normas técnicas), entre outros para que sejam criadas ferramentas que auxiliem o controle quantitativo e qualitativo dos recursos hídricos.

A própria ANA, sabendo da importância da medição de vazões e volumes para que possa executar suas ações, está criando uma portaria para a normalização de procedimentos de medição e níveis de precisão mínimos para situações e tipos de usuários diversos.

Outro fator importante para a determinação dos tipos de medidores (ou técnicas de medição) a serem utilizados é a tarifa a ser cobrada pela utilização da água bruta, que atualmente está definida para o estado do Ceará e Bacia do Paraíba do Sul (que abrange parte dos estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais) e em estudo em outras bacias. Exceto em raras exceções, como no Ceará, onde o usuário industrial paga R\$0,67/m³ de água (fonte: Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará – COGERH – 2003) e se justifica a utilização de medidores de alto custo e apropriados para água bruta, como os eletromagnéticos e ultra-sônicos, na grande maioria dos usuários a tarifa a ser aplicada será abaixo de R\$0,01/m³, como no Paraíba do Sul, fixada em R\$0,008/m³ (fonte: Comitê para Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul – CEIVAP - 2003). Com as tarifas baixas, torna-se discutível a viabilidade de instalação de medidores que só se pagariam em prazos superiores a um ano. Tudo isso justifica o investimento e estudos em criação de técnicas e equipamentos menos onerosos para a mensuração de recursos hídricos, como este apresentado adiante.

A melhoria da eficiência dos sistemas de irrigação é uma das condições prioritárias para se diminuir a crise da água e seus impactos, principalmente nos países em desenvolvimento. Responsável por 70% do total de água utilizada pelo homem, a irrigação é também a que apresenta o maior desperdício, pois cerca de metade da água utilizada para este fim não atinge as plantações e é perdida pela infiltração no solo e evaporação. Por conta disso, o assunto foi um dos destaques do 3º Fórum Mundial da Água, em Kyoto. (fonte: Autos Instituto Brasil Pnuma - Comitê Brasileiro do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente - 2003)

Segundo Lemos (2003), para se produzir uma tonelada de grãos são necessárias mil toneladas de água e, para uma tonelada de arroz, duas mil toneladas de água. Além disso, sistemas de irrigação mal planejados ou mal operados podem provocar a salinização e degradação dos solos. De acordo com Lemos (2003), as perdas irreparáveis de água na agricultura são de 2.500 Km³ por ano no Brasil, enquanto a indústria perde 117 Km³ e o consumo doméstico 64,5 Km³. Se fosse viabilizada uma redução de 10% nas perdas da irrigação, economizaria-se mais do que é perdido pela indústria e pelo consumo doméstico juntos.

Lemos (2003) afirma ainda que, se for possível melhorar as técnicas de irrigação nos países em desenvolvimento, iria sobrar água para abastecer a população. Em Israel, os sistemas eficientes fazem gotejar água perto da raiz da planta, com controle por computadores. Com isso, o país conseguiu exportar laranjas para a Europa durante anos. Indiretamente, estava exportando água.

Com toda a parte burocrática (legislação vigente e trâmites legais) executada, surgiu então a demanda técnica, ou seja, a metodologia de execução da mensuração da água a ser cobrada. Desta forma o autor passou a estudar uma forma de se mensurar a água da forma mais econômica possível, com um mínimo de precisão necessário e de acordo com a proposta da minuta da resolução da Agência Nacional de Águas em relação à macromedição.

O mercado nacional (fabricantes e fornecedores) de macromedidores ainda não está devidamente preparado para atender à demanda crescente de medidores de água bruta, visto que este crescimento se dará nos próximos anos, quando do início da cobrança pelo uso da água bruta nas diversas bacias hidrográficas. A grande maioria dos macromedidores encontrados no mercado atualmente não atendem às necessidades do setor de gestão, pois são elaborados para a utilização com água tratada ou fluidos com baixíssimo índice de sólidos em suspensão. As principais exceções são os medidores dos tipos eletromagnéticos e ultra-sônicos, mas têm como inconveniente o alto custo para aquisição. A própria COGERH tentou utilizar diversos tipos de medidores, inclusive importados específicos para irrigação, mas não obteve grandes resultados, sempre necessitando de calibração e manutenção com grande periodicidade e altíssima incidência de quebras e falhas.

Este trabalho tem por objetivo fornecer subsídios para se facilitar e possibilitar a mensuração de volumes e vazões de água bruta de forma mais econômica e com um nível mínimo de precisão, para ser utilizado principalmente pelas agências e comitês de gestão de recursos hídricos. Para atingir este objetivo será feito um estudo experimental utilizando um equipamento de alto custo e moderno, como é o medidor por ultra-som, associado ao uso de um equipamento de baixo custo como é o horímetro.

2 – A Experiência Existente na Medição de Vazões e Volumes

2.1 – Introdução

Neste capítulo são demonstradas algumas experiências consideradas econômicas e alternativas em relação às técnicas e equipamentos já consagrados e devidamente normalizados. As referências bibliográficas das experiências e métodos consagrados atualmente são vastas e não vão de encontro a este trabalho, que busca soluções alternativas ou recentes, daí a razão de não serem citadas.

2.2 – Projetos Piloto com a utilização do sistema horímetro/ultra-som

2.2.1 – A Experiência do Ceará

O Estado do Ceará conta atualmente com aproximadamente 400 sistemas de medição com horímetros aferidos por medidor ultra-sônico operando em propriedades rurais para o monitoramento de irrigantes que têm rios como fonte hídrica e outros 200 sistemas com poços como fonte hídrica.

Os usuários que possuem sistemas baseados na captação fluvial pagam ao órgão gestor desde fevereiro de 2002 (data de conclusão da instalação dos primeiros sistemas) a partir de leituras mensais dos horímetros. Os usuários que fazem captação em poços ainda não são cobrados e os dados de volumes captados são utilizados apenas para o monitoramento e estudos específicos, como os de recarga hídrica e capacidade volumétrica.

A cobrança iniciou-se com o valor de R\$ 0,01/m³ (fonte: COGERH - 2003), em um ano com atividades emergenciais devido à seca e atualmente está sendo realizado um estudo mais detalhado que atenda aos investimentos realizados e de forma que atenda à capacidade de pagamento dos usuários do semi-árido. Projeta-se uma taxa em torno de R\$ 0,005/m³, mas ainda não foi definida. Tal taxa viabilizaria a manutenção do sistema, mão de obra empregada e o restante se reverteria em benfeitorias na própria bacia hidrográfica.

Por ser uma atividade nova, no âmbito nacional, observou-se no início uma forte oposição por parte dos usuários no que diz respeito ao pagamento da água bruta, com alguns chegando a depredar o sistema de medição ou negando o acesso de técnicos às suas unidades de captação. Foi realizado um grande trabalho de conscientização da população e notou-se uma grande reversão do quadro anterior.

A instalação do horímetro nas bombas (em caixas de proteção de alumínio devidamente lacradas para garantir a inviolabilidade do sistema) e a aferição do sistema leva em torno de 1 hora e não necessariamente é preciso paralisar o bombeamento. As caixas de proteção dos horímetros são instaladas preferencialmente diretamente nas bombas, de forma que qualquer mobilização ou modificação destas seja evidenciada pela quebra do lacre de segurança. Não se inibe ao usuário a quebra dos lacres, desde que esta seja justificada (manutenção, defeito, mobilização, etc.)

Todos os pontos de captação e sistemas de recalque são georeferenciados e fotografados, permitindo detectar qualquer mobilização do sistema. É solicitado ao usuário que avise ou notifique sempre que uma bomba é alterada de posição ou a tubulação de recalque é modificada (extensão da tubulação, inserção de dispositivos que alterem a perda de carga na linha, ou alteração da carga manométrica).

A potência das bombas dos usuários monitoradas varia de 2CV a 1000CV e as captações não seguem uma padronização no que diz respeito às suas formas de instalação e, em muitos casos, são encontrados sistemas totalmente fora dos padrões hidráulicos e elétricos convencionados, no que diz respeito à sucção, instalações elétricas, pré-filtragem, cavitação, vibração, entre outros.

2.2.2 – A Experiência de Nebraska

O Twin Platte Natural Resources District - TPNRD do estado de Nebraska, Estados Unidos, também utiliza a combinação horímetros / aferição ultra-sônica para a mensuração de volumes de água bruta de usuários rurais como uma forma econômica de estimar volumes captados desde o ano 2000, ou seja, a data de origem das experiências do Ceará e de Nebraska se confundem. (fonte: Newsletter of The Twin Platte Natural Resources District Vol. 10 – 2000)

Mas as semelhanças com a experiência cearense terminam por aí. O objetivo do TPNRD é prestar tais serviços com o objetivo de orientar agricultores ao manejo adequado para irrigação, não visando o monitoramento, gestão ou cobrança dos recursos hídricos, não tendo portanto, a mesma necessidade de se conhecer melhor as incertezas da medição.

O usuário deve instalar o horímetro em seu sistema de recalque e solicita os serviços de aferição de vazão do TPNRD, que o faz com medidor ultra-sônico portátil com transdutores não intrusivos cedido pelo Nebraska Department of Environmental Quality e cobra uma taxa de US\$50 por ponto de aferição. As condições técnicas mínimas necessárias para os serviços de aferição seguem os princípios básicos para a operação de medidores ultra-sônicos, a saber: linha 100% cheia, livre de presença de bolsas de ar (altera a precisão da medida) e local para instalação em trecho reto de tubulação sem interferências (válvulas, tês, curvas, registros, etc.) em um comprimento de 10 diâmetros a montante do ponto de aferição e 5 a jusante. O usuário deve então solicitar outras aferições periódicas sempre que faz qualquer alteração na linha de recalque ou quando o achar conveniente.

2.3 – A Utilização de válvulas dispersoras cônicas como dispositivo de medição de vazões

Em razão de vantagens oferecidas pelas características mecânicas e hidráulicas, decorrentes de sua simplicidade geométrica, a válvula dispersora cônica (Figura 1) é hoje um dos dispositivos hidromecânicos mais utilizados para o controle dos escoamentos e dissipação de energia nas descargas de fundo das barragens. Sendo assim, a regulação das vazões nos estirões de jusante dos cursos d'água represados dependem da precisão das curvas de vazão geralmente fornecidas pelos seus fabricantes.

Pinto (1997) propôs uma nova metodologia e ábacos para a obtenção dos coeficientes de vazão das válvulas dispersoras, configurados em patamares de acordo com os tipos de válvulas existentes.

A utilização de válvulas como medidores dependem também de medidores auxiliares para sua aferição, como molinete, pitot ou medidor ultra-sônico.

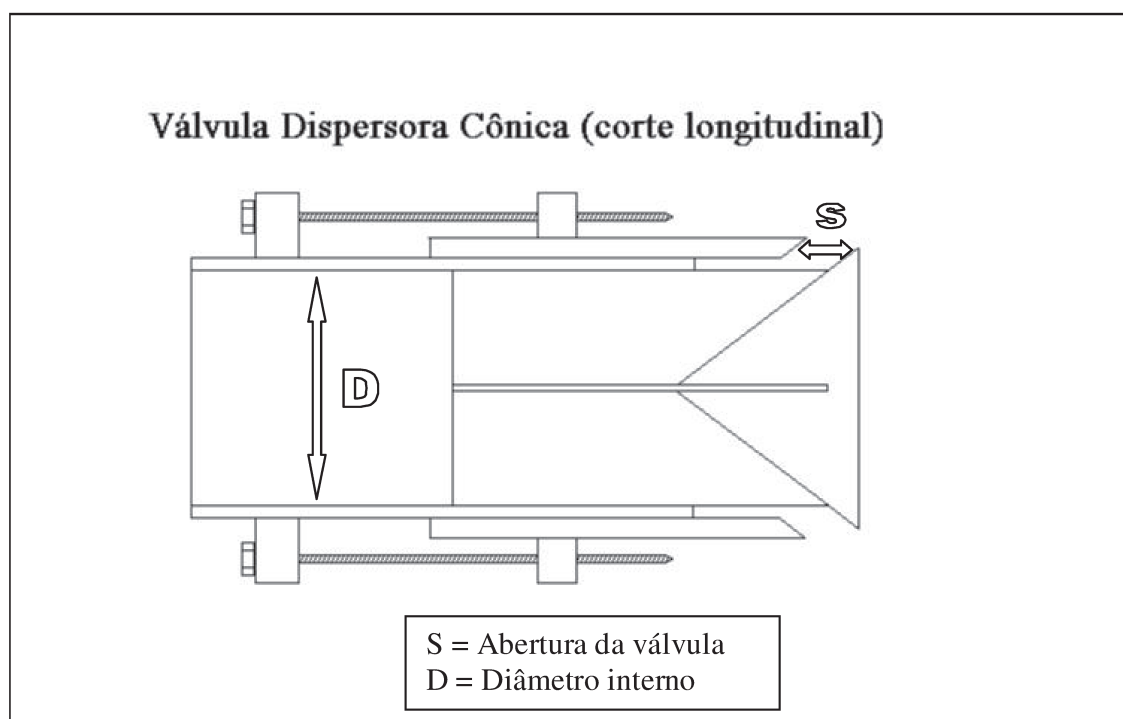


Figura 1 - Válvula Dispersora Cônica

2.4 – Medidores Proporcionais

Os medidores proporcionais foram criados com o objetivo de se medir volumes aduzidos em tubulações de diâmetros superiores a 50mm, partindo de uma concepção simples: a utilização de hidrômetros de diâmetros inferiores (geralmente ½ polegada), utilizados basicamente para medições residenciais. É instalada uma tomada em um ponto da adutora a montante do medidor e outra a jusante, de forma que esta capte uma vazão parcial do total aduzido. É feita então uma aferição da linha para se obter o coeficiente de proporcionalidade entre o volume aduzido pelo medidor e o volume total aduzido. (Fonte: Empresa Bahiana de Saneamento – Embasa – 1982)

As aferições são geralmente realizadas por pitometria, mas nada impede que as mesmas possam ser otimizadas para serem realizadas por medidor ultra-som.

Uma das grandes desvantagens deste sistema é a necessidade de manutenção diária quando utilizado com água bruta para a limpeza do filtro e este, à medida que vai retendo impurezas e partículas, passa a indicar volumes aduzidos abaixo do volume real. Conclui-se então que este sistema se aplica para sistemas que demandam baixa precisão e que possam assumir um alto risco em relação a falhas.

Os medidores proporcionais são muito utilizados em entradas de estações de tratamento de água de pequenas e médias dimensões por companhias de saneamento. Dificilmente são utilizados para a cobrança de água devido à sua falta de precisão e alto risco de falhas.

O seu custo permanece em torno de US\$35 a US\$ 50 por unidade.

2.5 – Experiências com Válvulas Controladoras de Vazão

No Brasil, várias companhias de saneamento já operam válvulas controladoras de vazão (também conhecida por Koval) e pressão em suas redes, seja para diminuir as perdas físicas, seja para gerenciar os consumos de forma mais racional. Um bom exemplo disto é a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), que além de lançar mão da utilização destas válvulas, implantou um sistema de monitoramento de vários pontos estratégicos de suas redes de abastecimento.

Tais válvulas possuem em geral um corpo único, ao qual podem ser agregadas diversas funções, tais como: controlador de vazões, limitadores de pressão, atuadores elétricos (por válvulas tipo solenóide), dispositivos anti-golpe de aríete, controladores de bombas, antecipadores de onda de choque, entre outros.

No caso das válvulas redutoras de pressão, mesma foi projetada visando a fácil adaptação a cada caso mediante a simples troca do cilindro dissipador, de baixo custo. O acionamento do cilindro móvel pode ser feito por um cilindro hidráulico ou pneumático, e este é comandado pelo circuito de controle de diversos tipos conforme a função que a válvula deva realizar. (Lemos – 1986)

As válvulas controladoras de vazões podem operar com ou sem um medidor acoplado, sendo que, nesta última opção, geralmente são utilizados medidores do tipo woltman, a ser descrito adiante. A título de exemplo, uma válvula controladora de pressões de diâmetro 100mm, tem um custo aproximado de US\$ 1.800,00, o que inibe sua ampla utilização.

Pode-se concluir que as válvulas controladoras, quando devidamente mantidas, são uma boa opção para evitar vazamentos e perdas em redes de distribuição de água, evitando que a mesma alcance altas pressões desnecessárias.

Conclui-se também que, quando se leva em consideração todos as experiências aqui demonstradas, observa-se uma grande variedade de possibilidades para a medição de vazões e volumes. O que vai levar à escolha de um ou outro método são principalmente fatores como custo, precisão demandada, condições locais (não se pode utilizar horímetros em sistemas gravitários, por exemplo).

3 – Equipamentos para Medição de Vazões e Volumes

3.1 – Introdução

Neste capítulo são indicados os equipamentos mais utilizados para medição de vazões e volumes de água bruta. Não foram aqui citados os medidores dos tipos venturi, rotâmetros, bocal, cotovelo, entre outros, por serem pouco utilizados para a medição de água bruta.

3.2 – Ultra-Som

Os medidores ultra-sônicos de vazões foram concebidos no final da década de 50 e início da década de 60 e apesar de amplamente utilizados no exterior, sua projeção no mercado nacional ainda pode ser considerada tímida, devido principalmente ao seu alto custo de aquisição (fonte: <http://www.ndt-ed.org>). Uma solução para atenuar o investimento seria a fabricação destes equipamentos no Brasil, o que motivaria a sua utilização, mas vários fatores influenciam tal iniciativa, como necessidade de desenvolvimento ou transferência tecnológica, assim como apoio dos organismos envolvidos, como por exemplo, da ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.

A ABNT vem já há cinco anos participando da comissão para a criação das normas para a utilização de medidores ultra-sônicos a partir das normas ISO (International Organization for Standardization). É de extrema importância que isso ocorra para que as indústrias e fabricantes de medidores possam investir no desenvolvimento deste tipo de medidor, pois é difícil se aplicar recursos em um equipamento que não pode ser homologado por falta de normas nacionais. (fonte: www.iso.ch)

O projeto de norma, já definida e em fase final de aprovação pela ISO, é identificada por ISO/TR12765:1998 (“Measurement of fluid flow in closed conduits – Methods using transit time ultrasonic flowmeters”) do comitê técnico TC 30/SC5. A previsão é que o projeto seja

divulgado como norma aprovada ainda em 2003. (fonte: www.iso.ch). Lynnworth(1983) e Magori(1985) também sugerem técnicas similares aos do projeto de norma.

A normalização também auxiliaria na divulgação de sua utilização, de forma que companhias de saneamento o poderiam utilizar como medidor padrão para calibrações não intrusivas em campo de outros tipos de medidores que operem com desvios de precisão superiores aos do ultra-som. Isto geraria uma grande economia de recursos em mão de obra e tempo dedicado.

O medidor ultra-sônico pode ser de dois tipos: Doppler e Tempo de Trânsito (Transit Time). Os do tipo Doppler foram desenvolvidos principalmente para medição de fluidos com alto nível de impurezas e sólidos em suspensão, não sendo recomendados para água tratada ou bruta com baixos índices de sólidos em suspensão (Brand, 1987). Podem também ser portáteis (o que facilita as aferições de vazões sob diversas condições) ou fixos (Figura 2).



A – Medidor Portátil



B – Medidor Fixo

Figura 2 – Medidor ultra-som portátil e fixo (fonte: www.panametrics.com)

Os medidores que utilizam o princípio Tempo de Trânsito têm maior precisão em relação aos Doppler e podem ser empregados em praticamente todos os tipos de água bruta, com desvio de precisão típica de $\pm 1\%$ e de no máximo $\pm 2\%$. Por estes motivos foram selecionados para serem retratados aqui de forma mais intensa. (fonte: www.panametrics.com). Kohno (et al-1984) sugere a utilização de medidores dotados de diagnóstico, como potência do sinal, por exemplo, para se conseguir maior segurança nas medições.

Princípio de funcionamento no modo tempo de trânsito: A velocidade do fluido é determinada utilizando o diferencial de tempo de viagem. Um pulso de som viajando diagonalmente através do fluxo na direção do transdutor de jusante(B) é mais rápido que um pulso na direção do transdutor de montante(A).(Figura 3)

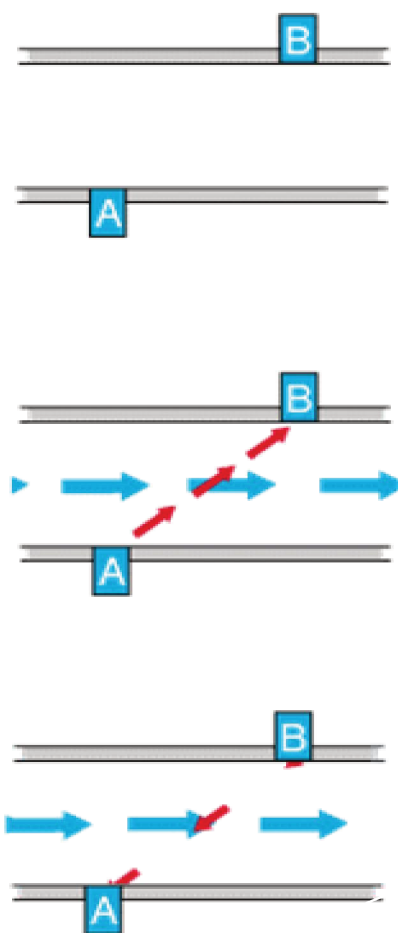


Figura 3 – Princípio de funcionamento por tempo de trânsito

Na opção tempo de trânsito, o medidor pode operar com transdutores não intrusivos, sendo possível operar em diâmetros de 0,5 polegadas a 200 polegadas e tubos em qualquer tipo de metal, a maioria dos plásticos, borracha, vidro e cimento, que o evidencia pela versatilidade de operação (Belock e McDonald, 2002).

3.2.1 – Medição Ultra-sônica por tempo de trânsito

A seguir é fornecida orientação dos princípios e características de projetos de medidores ultra-sônicos de vazão baseados na medição da diferença do tempo de trânsito para medições de vazões de fluidos, que serão utilizados como referenciamento deste trabalho. Demonstra suas operações, performances e calibrações.

3.2.2 – Referências Normativas

As seguintes normas contêm provisões que auxiliam o desenvolvimento de cálculos apresentados neste trabalho

- ISO 4006:1991, medição de vazão de fluidos em condutos fechados – vocabulário e símbolos;
- ISO 4185:1980, medição de vazão de fluidos em condutos fechados – método de pesagem;
- ISO 8316:1987, medição de vazão de fluidos em condutos fechados – método de coleta do líquido em um tanque volumétrico;
- ISO 9300:1990, medição de vazão de gás pela média da vazão crítica do bocal Venturi;
- ISO 9951:1993, medição de vazão de gás em condutos fechados – medidores de turbina.
- Vocabulário Internacional Básico e Geral de Termos em Metrologia (VIM)

3.2.3 - Definições

3.2.3.1 – Método “Diferença de Tempo de Trânsito” (*Transit Time Difference*): Método de medição de vazão no qual a velocidade média do fluido pelo trajeto acústico ($\bar{v}$) é determinado a partir da diferença do tempo de trânsito de dois sinais ultra-sônicos, viajando de montante para jusante e vice-versa, cobrindo a mesma distância no fluxo do fluido.

3.2.3.2 – Método “Superfície Principal”: Método de medição de vazão no qual os tempos de trânsito dos pulsos ultra-sônicos t_1 e t_2 (Figura 4) são medidos baseados no método de análise do sinal recebido em pré-determinados níveis de amplitude.



Figura 4 – Princípio de medição utilizando o método “Superfície Principal”

3.2.3.3 – Método “Frequência de Repetição de Pulsos” : Método utilizado em medidores de vazão ultra-sônicos aonde dois sinais independentes de pulso são transmitidos em direções opostas. Cada pulso é emitido imediatamente após a detecção do pulso precedente. As diferenças entre as frequências de repetição dos pulsos nas duas direções formam uma função da velocidade do fluido, que é medida.

3.2.3.4 – Método “Lambda-Locked-Loop” : Método de medição de vazão no qual a medida da velocidade média do fluido através do trajeto acústico ($\bar{v}$) é derivada da diferença da frequência do som com o mesmo comprimento de onda viajando em sentidos opostos através do fluido.

3.2.3.5 - Método “Cruzamento do Zero” (*Zero Crossing*): Método de medição de vazão no qual os tempos de trânsito t_1 e t_2 (Figura 5) de pulsos ultra-sônicos são medidos usando o

primeiro ou outro pré-determinado “cruzamento do zero” do sinal recebido seguindo a primeira alternância em relação ao eixo de referência.(Figura 5).

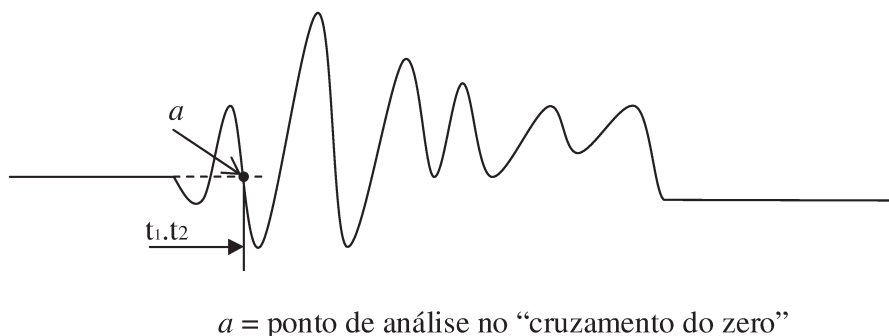


Figura 5 – Princípio de medição utilizando o método “Cruzamento do Zero”

3.2.3.6 - Método “Multi-Trajetos” (*Multi-Path*): Método de medição de vazão com sinais ultra-sônicos no qual a velocidade média do fluido ao longo do trajeto acústico ($\bar{v}$) sobre um número de trajetos diferentes é determinada.

3.2.3.7 - Método “Pulso Simultâneo” (*Simultaneous Pulse*): Método de medição de vazão com dois trajetos acústicos nos quais os sinais são emitidos simultaneamente em direções opostas.

3.2.3.8 - Método “Troca de Fase” (*Phase Shift*): Método no qual a velocidade média do fluido ao longo do trajeto acústico ($\bar{v}$) é determinado a partir da troca de fases de sinais ultra-sônicos no fluxo do fluido.

3.2.3.9 - Medidor de Vazão Ultra-Sônico (USM): medidor de vazão que gera sinais ultra-sônicos e os recebe novamente após eles terem sido influenciados pelo fluxo de forma que o resultado observado possa ser utilizado como uma medição de vazão.

3.2.3.10 – Integrador de Vazão – Dispositivo para medição de volume por integração de tempo da taxa de vazão.

3.2.3.11 – Transdutor Ultra-Sônico - Elemento que converte energia acústica em sinais elétricos e vice-versa.

Obs.: um transdutor ultra-sônico pode operar tanto quanto transmissor ou receptor.

3.2.3.12 – Posicionamento não Intrusivo (*Clamp-On*) – Posicionamento no qual os transdutores são acoplados à parede externa do conduto no qual a vazão será medida.

3.2.3.13 – Tubo de Medição – Seção de conduto especialmente fabricado contendo transdutores ultra-sônicos em conformidade com todas as especificações da norma. No caso de utilização de transdutores *Clamp-on*, passa a ser o trecho do tubo onde serão instalados os transdutores.

3.2.3.14 – Seção de Medição - Seção de um conduto consistindo do tubo de medição, a seção interna e a seção externa.

3.2.3.15 – Trajeto Acústico – Trajeto de um sinal ultra-sônico entre dois transdutores.

3.2.3.16 – Comprimento do Trajeto, L_p – O comprimento do trajeto acústico no fluido a partir das faces dos dois transdutores. Ver figuras 6A e 6B.

3.2.3.17 – Comprimento de Interrogação, L – O comprimento da parte do trajeto acústico no fluido que tangencia o conduto. Ver figuras 6A e 6B.

3.2.3.18 – Distância de Interrogação – Projeção do comprimento de interrogação na linha paralela ao eixo do tubo ou do fluxo. Ver figuras 6A e 6B.

3.2.3.19 – Ângulo de Inclinação ϕ - Ângulo entre os eixos dos transdutores ultra-sônicos e uma linha paralela ao eixo do conduto. Ver figura 6A.

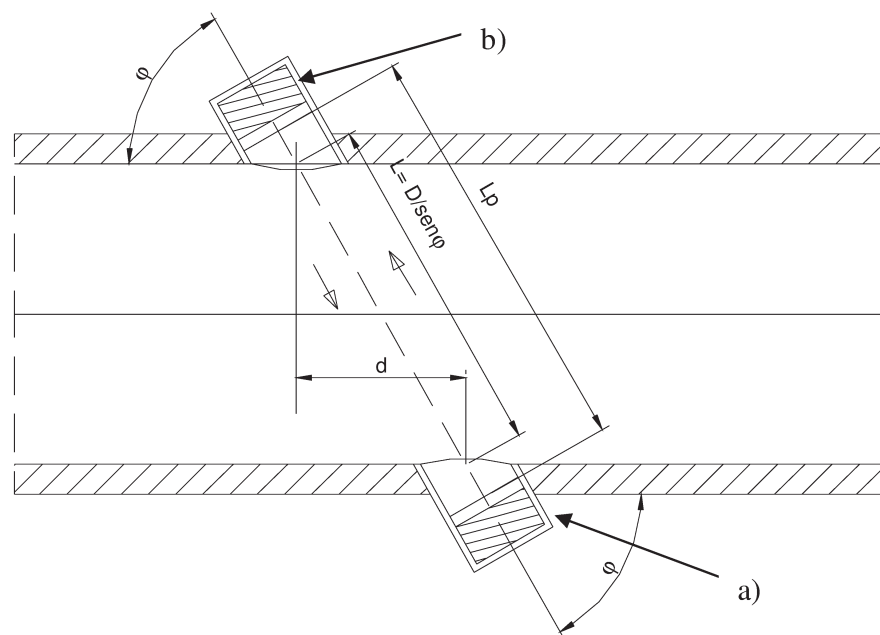
3.2.3.20 – Ângulo de Fase – Posição da fase de uma oscilação.

3.2.3.21 – Velocidade de Propagação c – Velocidade de sinais acústicos relativa a um observador em repouso.

3.2.3.22 – Velocidade do Som c_0 – Velocidade de sinais acústicos no fluido em repouso.

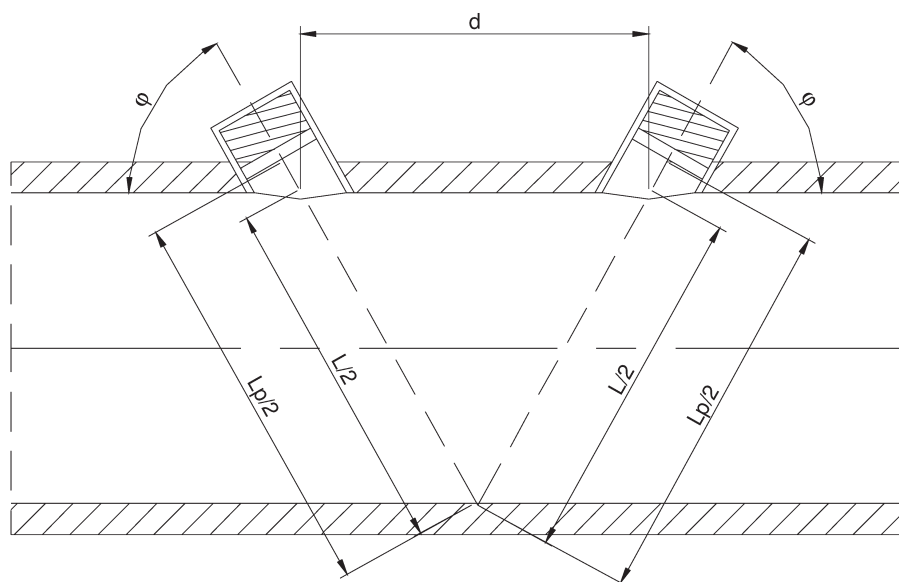
3.2.3.23 – Velocidade Média do Fluido ao Longo do Trajeto Acústico $\bar{v}$ - Velocidade do fluido no plano que é formado pelo trajeto acústico e a direção do fluxo.

3.2.3.24 – Velocidade Média Axial do Fluido $\bar{v}_A$ - Relação da taxa de vazão (q_v)(a integral de uma seção transversal do tubo de medição dos componentes axiais das velocidades locais do fluido(v)) e a área da seção transversal de medição (A)



a) Receptor / Emissor

b) Receptor / Emissor



B – Medidor de diagonal refletida (indireto ou 2 travessas)

Figura 6 – Formas de instalação de medidor de trajeto único.

3.2.3.25 – Fator de Correção de Distribuição de Velocidades k_h - Relação entre a velocidade média axial ($\bar{v}_A$) e a velocidade média do fluido ao longo do trajeto acústico($\bar{v}$).

3.2.3.26 – Pulso Ultra-Sônico – Sinal ultra-sônico gerado por um pulso elétrico no transdutor.

3.2.3.27 – Tempo de Trânsito t - Tempo necessário para a travessia de um pulso ultra-sônico no trajeto acústico.

3.2.3.28 – Diferença de Tempo de Trânsito Δt - Diferença entre os tempos de trânsito dos sinais acústicos propagados de montante para jusante e vice-versa.

3.2.4 – Princípios Gerais de Medição

O princípio básico utilizado pelos medidores ultra-sônicos é que o som viajando a favor do escoamento do fluido irá viajar mais rápido do que o som viajando contra o escoamento.

Os tempos de trânsito e a diferença de tempo são funções da velocidade do fluido. A medição pode ser realizada tanto por medição dos tempos de trânsito diretamente quanto através da utilização da medição de frequência ou de fases. Os medidores ultra-sônicos são basicamente bi-direcionais. A taxa de vazão (q_v) é determinada pelo produto da área da seção transversal (A), com a velocidade média axial do fluido ($\bar{v}_A$).

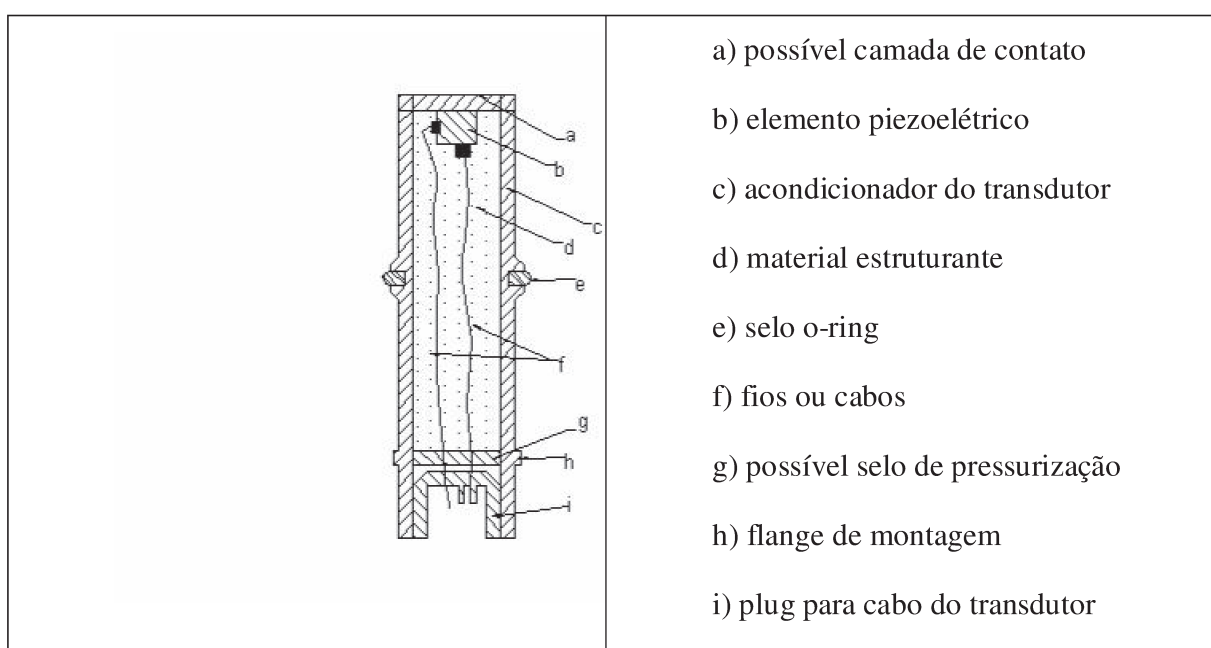
3.2.4.1 – Geração dos Sinais Ultra-Sônicos

Os sinais ultra-sônicos requeridos para a medição da vazão são gerados e recebidos por transdutores ultra-sônicos (utilizando cristais piezoelétricos, por exemplo).

Os transdutores piezoelétricos (Figura 7) empregam cristais ou cerâmicas que são condicionados a uma vibração quando se alterna a voltagem aplicada a seus terminais.

O elemento de vibração então gera ondas de pressão longitudinal (ondas sonoras) no fluido. As ondas sonoras incidentes em cada elemento piezoelétrico produzirão sinais elétricos em seus terminais, assim como os efeitos piezoelétricos são reversíveis, ou seja, produzir ondas sonoras a partir de sinais elétricos.

As propriedades acústicas do transdutor (padrão de alcance, frequência de ressonância, banda de frequência, etc.) dependem diretamente da construção do transdutor.



OBS: O material de acondicionamento do transdutor pode ser, dependendo de sua aplicação, de metal, plástico, etc..

Figura 7 – Possível projeto de um transdutor piezoelétrico.

O padrão de projeção em decibéis de uma onda sonora criada por um piezômetro pode ser visualizada na Figura 8, onde cada divisão da escala radial do diagrama polar corresponde a 10 dB.

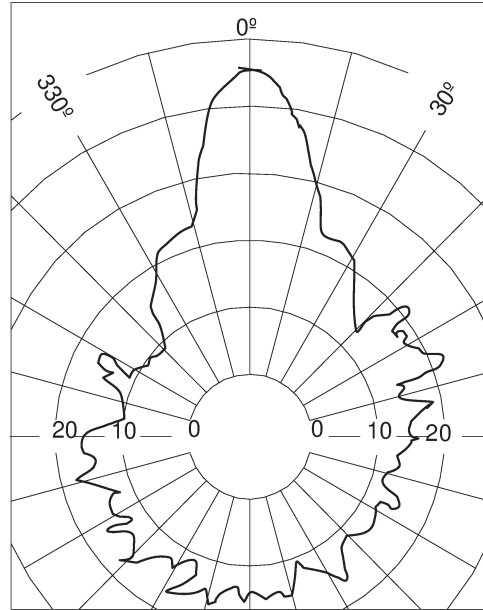


Figura 8: Padrão de projeção medido de um transdutor com um diâmetro externo de 2 cm à frequência de 162 kHz.

3.2.4.2 – Método do Tempo de Trânsito

A velocidade de propagação c será o somatório da velocidade do som c_o e a componente de velocidade do fluido $\bar{v} \cos \phi$ na direção do trajeto acústico (Figuras 6A e 6B).

$$c = c_o \pm \bar{v} \cos \phi \quad (01)$$

Se os transdutores piezoelétricos forem montados em contato com o fluido no interior do tubo de medição (Figura 11B), os sinais ultra-sônicos podem se propagar entre montante e jusante do fluxo. Os tempos de trânsito entre montante e jusante dos pulsos ultra-sônicos no fluxo são dados por:

$$t_1 = \frac{L}{c_o - \bar{v} \cos \phi} \quad (02)$$

$$t_2 = \frac{L}{c_o + \bar{v} \cos \phi} \quad (03)$$

$$\frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1} = \frac{2\bar{v} \cos \phi}{L} \quad (04)$$

com :

$$\cos \phi = \frac{d}{L} \quad (05)$$

e :

$$\Delta t = t_1 - t_2 \quad (06)$$

$$\bar{v} = \frac{L^2}{2d} \cdot \frac{\Delta t}{t_1 t_2} \quad (07)$$

No caso em que os transdutores são ajustados para trás da parede da tubulação, o comprimento de interrogação (L) é substituído pelo comprimento de trajeto (L_p). Os tempos de trânsito (t_1) e (t_2) são definidos como os tempos de trânsito do sinal através de L_p . Assim:

$$\bar{v} = \frac{L_p^2}{2d} \cdot \frac{\Delta t}{t_1 t_2} \quad (08)$$

A Equação (8) compensa diretamente o tempo que o sinal permanece interno, assumindo-se que a velocidade do som no fluido estacionário é a mesma que no fluido em movimento.

NOTA: As equações (10), (14) e (15c) são para os transdutores molhados, que ficam em contato direto com o escoamento. Para os transdutores retraídos, que possuem uma câmara onde são alojados os transdutores de modo que estes fiquem sem contato direto com o escoamento, L tem que ser alterado para L_p . (Equação 8).

Método “Repetição de Pulsos”

Em vez dos tempos de trânsito diretos (t_1) e (t_2) referenciados anteriormente, no caso do método de repetição de pulsos as frequências (f_1) e (f_2) são medidas. Ocorrem quando um pulso ultra-sônico que está alcançando o receptor vai gerar um novo sinal no emissor. Isto é:

$$f_2 - f_1 = \frac{1}{t_2} - \frac{1}{t_1} = \frac{\Delta t}{t_1 t_2} \quad (09)$$

Em vez da equação (7), resulta:

$$\bar{v} = \frac{L^2}{2d} (f_2 - f_1) \quad (10)$$

Método da Troca de Fase

A – Método da “Diferença de Fases”.

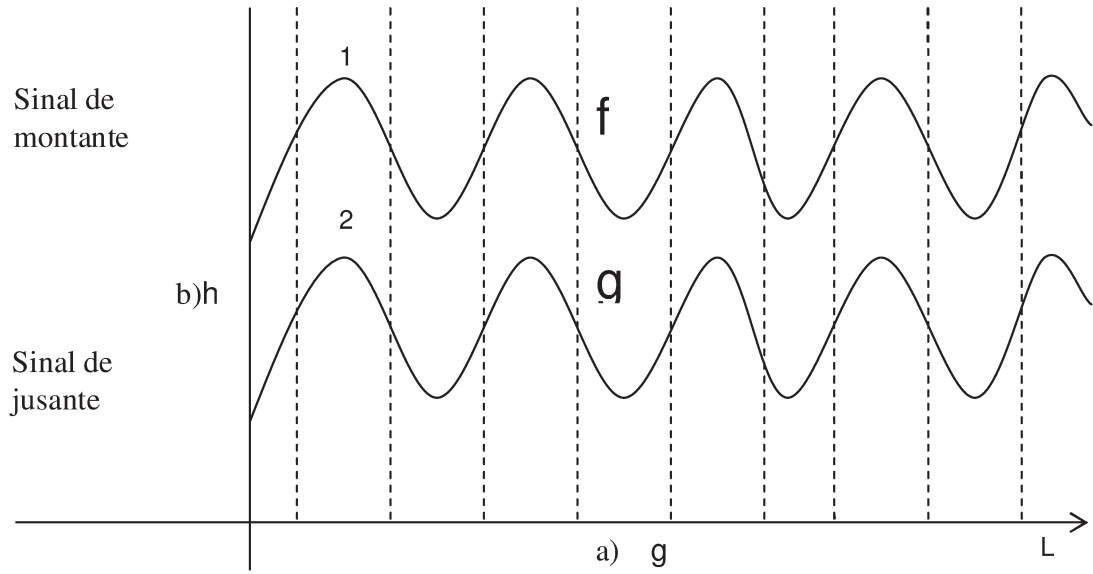
Em vez da medição direta do sinal dos tempos de trânsito, os ângulos de fase γ_1 e γ_2 de dois sinais permanentes com a frequência cíclica expressa por:

$$\omega = 2\pi f \quad (11)$$

Podem ser usados para determinar t_1 e t_2 (Figura 9). Assim:

$$\gamma_1 = \omega t_1 = 2\pi f t_1 \quad (12)$$

$$\gamma_2 = \omega t_2 = 2\pi f t_2 \quad (13)$$



a) Posição no trajeto acústico

b) Amplitude de sinal

Figura 9 – Fases dos sinais ultra-sônicos a montante e jusante

Das equações (12), (13) e (7) resulta:

$$\bar{v} = \frac{L_2 \pi f}{d} \cdot \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\gamma_1 \gamma_2} \quad (14)$$

B – Método do “Controle de Fases”.

A frequência constante (f) pode ser reposicionada em ambas as direções por frequências variáveis ($f1$) e ($f2$). Através do controle de fases é possível se ter sinais em ambas as direções com comprimentos de onda constantes em fase idêntica. $\gamma_1 = \gamma_2 = 2\pi m$ (m preferencialmente como integrador). Neste caso os tempos de trânsito serão:

$$t_1 = \frac{m}{f_1} \quad t_2 = \frac{m}{f_2} \quad \frac{\Delta t}{t_1 t_2} = \frac{1}{m} (f_2 - f_1) \quad (15)$$

Substituindo a equação (7), será:

$$\bar{v} = \frac{L^2}{2md} \cdot (f_2 - f_1) \quad (15a)$$

desde que Lambda Locked Loop indique $\lambda = L/m$, então:

$$\bar{v} = \frac{\lambda L_p}{2d} \cdot (f_2 - f_1) \quad (15b)$$

O comprimento de onda λ depende da velocidade instantânea do som no fluido em repouso (c_0), assim como da velocidade do escoamento. Sempre que o “lambda-locked-loop” é quebrado (por exemplo, por perda do sinal ou mudança na direção do sinal de transmissão), o “loop” pode ser reestabelecido com um número diferente de ciclos (por exemplo, um ‘ m ’ diferente). O ‘ m ’ provido é o mesmo em ambas direções de transmissão, λ pode ser determinado a partir de $\lambda = c_0 / \bar{f}$ onde $\bar{f} = (f_1 + f_2) / 2$

Então:

$$v = \frac{c_0 L}{2 \bar{f} d} (f_2 - f_1) \quad (15c)$$

3.2.4.3 – Calculando a Taxa de Vazão (q_v)

Usando a disposição de trajeto único (tipo diamétrico):

A vazão (q_v) é determinada por:

$$q_v = A \bar{v}_A \quad (16)$$

No método de tempo de trânsito, somente a média da velocidade do fluido ao longo do trajeto acústico é determinada.

Para se determinar a velocidade média axial ($\bar{v}_A$) na seção transversal (A) e concomitantemente a taxa de vazão (q_v), o fator de correção de distribuição da velocidade (k_h) precisa ser conhecido. O fator k_h é resultado da velocidade do contorno do tubo a ser medido.

Dessa forma, temos:

$$k_h = \frac{\bar{v}_A}{\bar{v}} \quad (17)$$

Que se direciona para:

$$q_v = k_h A \bar{v}_A \quad (18)$$

O valor k_h é uma função do número de Reynolds Re_D (Figura 10) e pode ser calculado aproximadamente pelo desenvolvimento total da distribuição de velocidades em um fluxo axi-simétrico sem turbulências. k_h não pode ser definido para a transição de escoamento

laminar para turbulento, isto é, para $2300 < Re_D < 10000$. Este intervalo de Re_D é representado na Figura 10 por uma faixa hachurada.

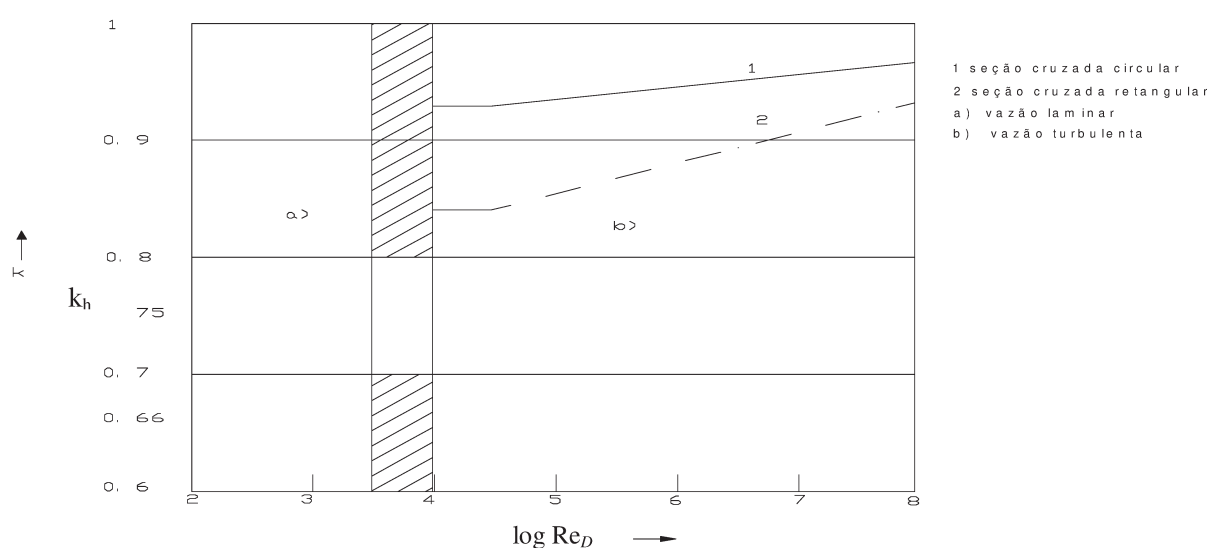


Figura 10 – Valor aproximado para k_h em função de Re_D

Usando a Disposição Multi-Trajetos:

Quando $\bar{v}$ é medido em planos paralelos diferentes (usando a disposição multi-trajetos de trajetos acústicos), $\bar{v}_A$ pode ser avaliado utilizando-se técnicas de integração através da área de seção transversal A (ver 3.2.6.2). Por exemplo, com determinados valores de tempos de trânsito (t_{1i}) e (t_{2i}) medidos a montante e jusante em n planos paralelos, a velocidade média resultante $\bar{v}_i$ pode ser calculada usando:

$$q_v = A \sum_{i=1}^n w_i v_i \quad (19)$$

Onde as velocidades $\bar{v}_i$ são medidas nos planos i ($i=1$ para $i=n$) e w_i (fator de peso) depende das técnicas de integração utilizadas como Gauss ou Gauss-Jacobi. Os arranjos multi-trajetos ajudam a reduzir as incertezas ao se estimar a velocidade de escoamento devido ao perfil do escoamento, mas por outro lado não devem ser utilizados em grandes diâmetros por força da baixa potência do sinal sonoro, que teria de percorrer um trajeto mais longo.

3.2.5 – Tipos de Montagens dos Transdutores Ultra-Sônicos

3.2.5.1 – Montagem dos Transdutores

São utilizados no mínimo dois transdutores ultra-sônicos no método “tempo de trânsito”. Os transdutores deverão ser inseridos em contato com o fluido ou ligados externamente à parede do conduto (modelo Clamp-on)(Figura 11).

Os transdutores ultra-sônicos inseridos sobre o conduto são ambos montados em um ângulo oblíquo na parede do conduto. Em caso algum o ângulo entre a direção de escoamento axial e a(s) linha(s) formada(s) diretamente entre os transdutores é 90°.

NOTA: o modelo Clamp-on é somente aplicado na medição de líquidos.

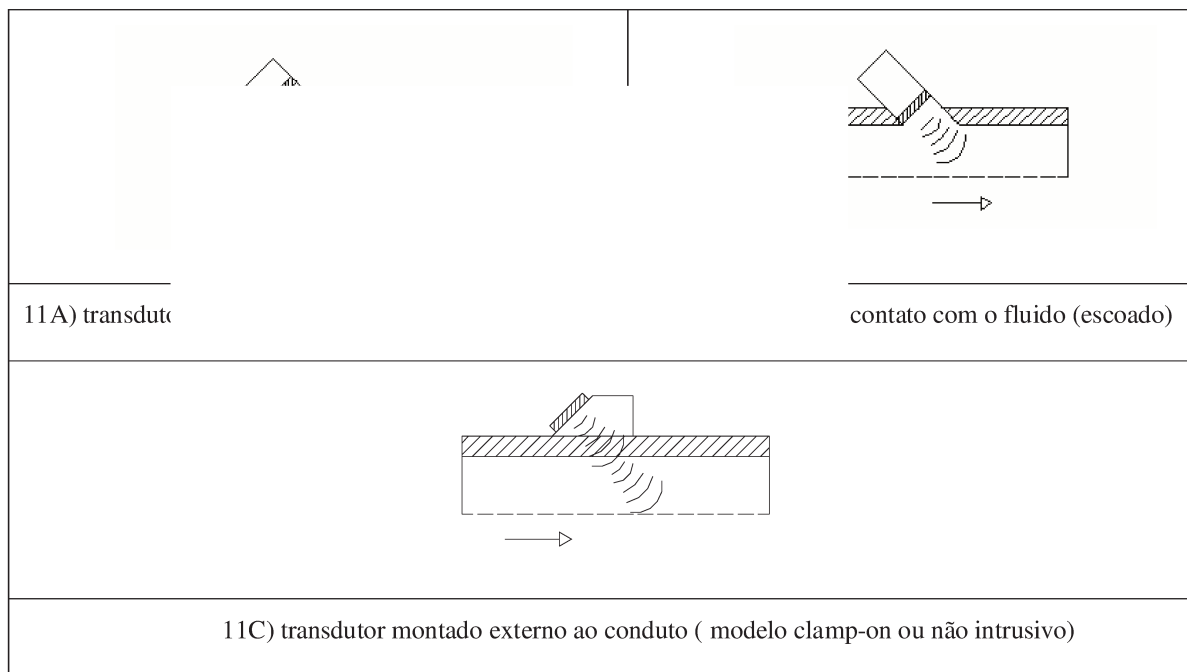


Figura 11 – Tipos de transdutores

Montagem Trajeto Único (single-path)

A transmissão acústica entre os transdutores pode ser tanto direta quanto indireta, usando a parede interna do conduto como refletor (Figuras 12A e 12B) contribuindo no acréscimo do comprimento do trajeto acústico. Isto implica que os transdutores são montados tanto do mesmo lado quanto em lados opostos do conduto (Figuras 12A e 12B).

Em uma medição de trajeto único com transmissão direta entre transdutores, os mesmos podem estar localizados ao longo do conduto por um diâmetro inclinado ou por uma corda imaginária inclinada (Figuras 12C e 12D). Para pequenos diâmetros de tubulação, os transdutores podem ser montados axialmente, como mostra (Figura 12E):

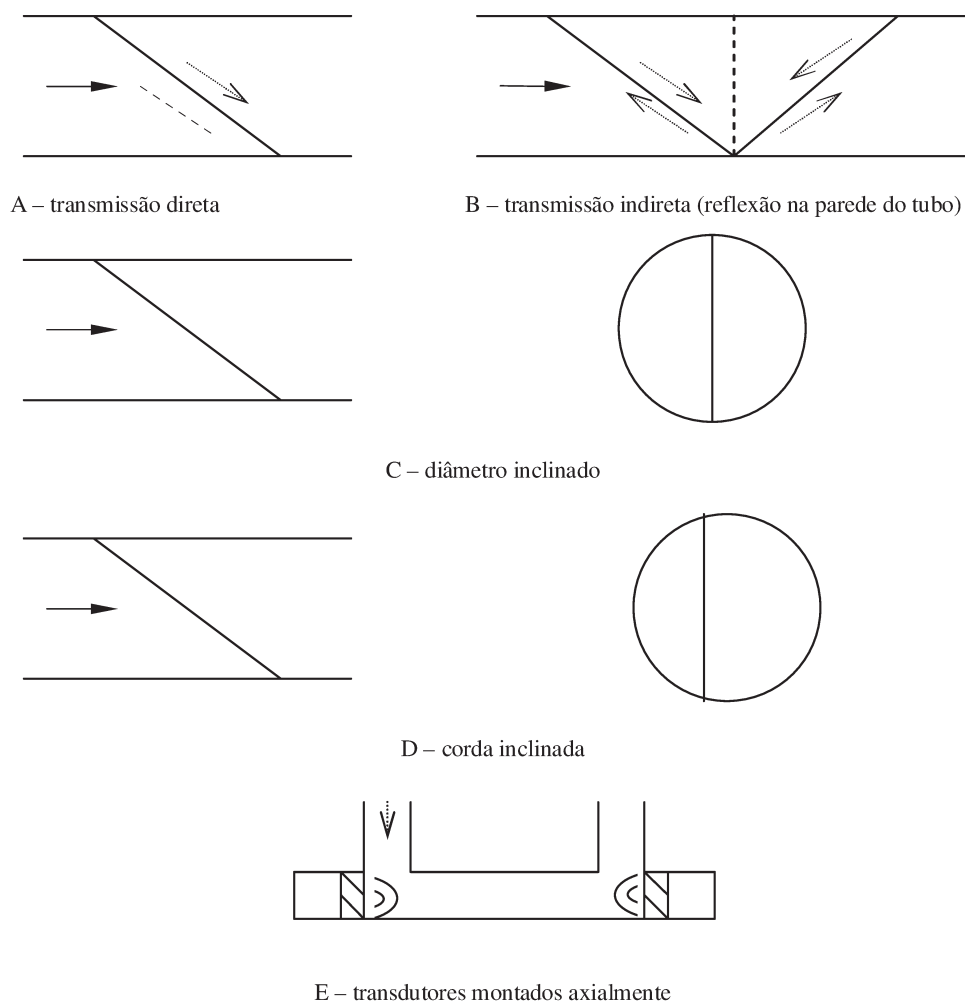


Figura 12 – Montagem trajeto único

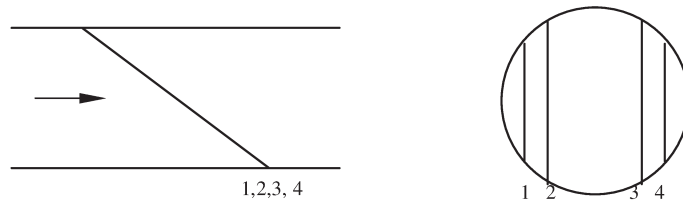
Montagem Multi-Trajeto (multi-path):

Uma medição de multi-trajetos é normalmente baseada na transmissão direta ao longo de duas ou mais cordas ou diâmetros inclinados. O transdutor pode ser montado de diversas maneiras no intuito de minimizar a sensibilidade a turbulências ou outras perturbações ao perfil de escoamento. Exemplos (Figuras 13A a 13D), incluindo:

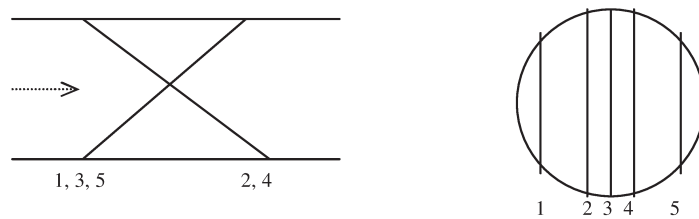
- montagem em plano simples;
- montagem cruzada simétrica ou assimétrica;

- montagem com pares combinados.

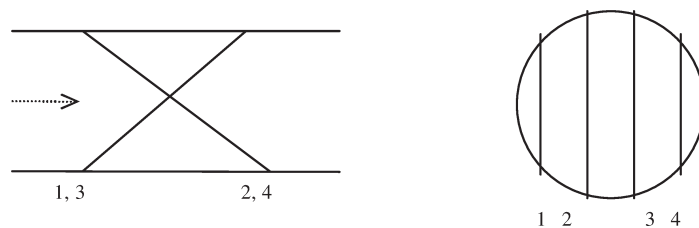
A montagem cruzada permite um maior número de trajetos sobre um determinado conduto, do que a montagem com plano simples ou a montagem com pares combinados. As medições por multi-trajetos também podem ser baseadas em uma rede com trajeto acústico espaçado.



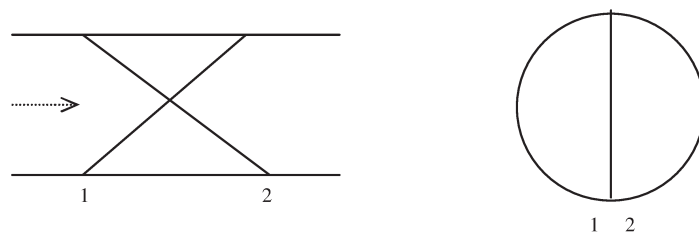
A - plano simples



B - cruzado simétrico



C - cruzado assimétrico



D - par combinado

Figura 13 – Instalação multi-trajetos

Arquitetura dos Transdutores:

Os próximos critérios são, entre outros, significativos no desenvolvimento dos transdutores:

- adaptação mecânica e acústica entre o conduto e o fluido;
- para condutos em contato com o fluido, selecionar e montar o mecanismo acústico unindo os transdutores na parede do tubo;
- em montagem “clamp-on”, para se obter um bom sinal acústico, é imprescindível uma boa fixação dos transdutores com a parede do tubo;
- possibilidade de montagem e remoção sob condições operacionais;
- adaptação aos alcances necessários de temperatura e pressão;
- proteção de umidade;
- proteção de corrosão;
- condição de proteção.

Os transdutores são componentes críticos na medição de vazão, podendo afetar a precisão da medição ultra-sônica.

Se as características físicas dos transdutores mudam com o tempo, o sinal deteriorado pode atrapalhar a comunicação. Os transdutores devem passar estritamente por um controle de qualidade no processo de fabricação. Possíveis mudanças observadas no desempenho dos transdutores devem ser reparadas pelo fabricante.

Ligação dos Cabos:

Ao se ligar qualquer cabo comprido entre o transdutor e a unidade de controle, é importante considerar em ambos a extensão máxima para determinação dos dados e o prolongamento do tempo de transferência (ver 3.2.6.2); as especificações de tais cabos devem ser informadas pelo fabricante.

3.2.5.2 – Unidade de Controle ou Conversor

Operação dos Transdutores:

Os transdutores podem ser excitados simultaneamente ou alternadamente com uma ou mais transmissões em cada direção. A frequência acústica, comprimento do pulso e taxa de repetição do pulso podem variar, principalmente dependendo do tipo de fluido e o comprimento do trajeto (Lp).

Processamento dos Dados:

A seção de processamento, em adicional à estimativa de vazão medida pelo tempo de trânsito, deve ser capaz de rejeitar as medidas inválidas, os ruídos, etc.... A indicação da vazão deve ser o resultado de uma ou mais determinações individuais da velocidade do fluido.

Mostradores e Saídas:

A maioria dos medidores ultra-sônicos de vazão tem várias saídas disponíveis, tanto opcional ou de série. Os mostradores ou “displays” podem mostrar a vazão, volume acumulado e/ou direções de fluxo, e podem ser analógicos ou digitais. Os sinais de saída podem englobar: corrente, voltagem, saída digital e pulsos proporcionais à vazão ou volume. Estas saídas podem ser ou não eletricamente isoladas. As unidades de controle podem também incluir alarmes sonoros e ferramentas para diagnósticos.

3.2.6 – Incertezas de Medição

As fontes das incertezas incluem:

- as incertezas relacionadas com o escoamento e o fator de correção de distribuição de velocidade (k_h) ou o peso de medição (w);

- as incertezas relacionadas com os parâmetros geométricos do tubo medido;
- as incertezas relacionadas com a medição de tempo.

3.2.6.1 – Procedimentos de Cálculo

Medição da Taxa de Vazão Usando o Trajeto Único

A velocidade média medida ao longo de um trajeto acústico é dada pela equação (7). A medida da taxa de vazão é dada pela equação (18). Combinando ambos para uma canalização do diâmetro interno D , com $A = \pi D^2 / 4$, teremos:

$$q_v = k_h \frac{\pi}{4} D^2 \frac{L}{2d} \frac{\Delta t}{t_1 t_2} \quad (20)$$

A incerteza relativa em q é obtida determinando o diferencial total da equação e dividindo o por q_v :

$$\frac{\delta q_v}{q_v} = \frac{\delta k_h}{k_h} + 2 \frac{\delta D}{D} + 2 \frac{\delta L}{L} - \frac{\delta d}{d} + \frac{1}{(t_1 - t_2)t_1 t_2} (t_2^2 \delta t_1 - t_1^2 \delta t_2) \quad (21)$$

As potências quadradas dos componentes são adicionadas para se obter:

$$E_{q_v}^2 = E_{k_h}^2 + 4E_D^2 + 4E_L^2 + E_d^2 + \frac{1}{(t_1 - t_2)^2} (t_2^2 E_{t1}^2 + t_1^2 E_{t2}^2) \quad (22)$$

Onde:

E_{q_v} - incerteza relativa da medida da taxa de vazão;

E_{k_h} - incerteza relativa do fator de correção de distribuição de velocidades;

E_D - incerteza relativa do diâmetro do tubo(área);

E_d - incerteza relativa da distância de interrogação;

E_L - incerteza relativa ao comprimento de interrogação;

E_{t1} - incerteza relativa do tempo de trânsito t_1 ;

E_{t2} - incerteza relativa do tempo de trânsito t_2 .

Na derivação acima é assumido que todos os parâmetros são independentes e assim suas incertezas podem ser potencializadas (ao quadrado) e adicionadas para obter o quadrado da incerteza relativa resultante.

Medição da Taxa de Vazão Usando o Arranjo Multi-Trajeto (multi-path)

A taxa de vazão (q_v) pode ser obtida por medições em vários trajetos por integração aproximada, dada pela equação (19). Neste caso a combinação da equação (19) com a equação (7) resulta em:

$$q_v = \frac{\pi}{4} D^2 \sum_{i=1}^n w_i \left(\frac{L_i^2}{2d_i} \right) \left(\frac{\Delta t_i}{t_{1i} t_{2i}} \right) \quad (23)$$

A incerteza relativa em (q_v) é obtida determinando o diferencial total da equação (23) e dividindo por q_v :

$$\frac{\delta q_v}{q_v} = \frac{2D}{D} + \sum_{i=1}^n \left[\frac{\delta w_i}{w_i} + 2 \frac{\delta L_i}{L_i} - \frac{\delta d_i}{d_i} + \frac{(t_{2i}^2 \delta t_{1i} - t_{1i}^2 \delta t_{2i})}{(t_{1i} - t_{2i})(t_{1i} t_{2i})} \right] \quad (24)$$

As potências quadradas dos componentes, assumidas independentes, são adicionadas para obter:

$$E_{q_v}^2 = 4E_D^2 + \sum_{i=1}^n \left[E_{w_i}^2 + 4E_{L_i}^2 + E_{d_i}^2 + \frac{1}{(t_{1i} - t_{2i})} (t_{2i}^2 E_{t_{1i}}^2 + t_{1i}^2 E_{t_{2i}}^2) \right] \quad (25)$$

Onde os componentes das incertezas relativas são definidas da mesma maneira como determinado anteriormente e E_{w_i} são as incertezas relativas em w_i .

3.2.6.2 – Fatores de Influência

Fatores Relacionados a Escoamentos com Perturbações

Perturbações no escoamento causam incertezas na medição de $\bar{v}$ e cálculo de $\bar{v}_A$.

A incerteza é influenciada por:

- escoamento ao redor do transdutor;
- a existência de componentes transversais de escoamento (escoamento turbulento);
- o modelo do perfil da velocidade axial;
- pulsações

A incerteza pode ser reduzida por:

- aumentando o comprimento dos sinais de montante e jusante no tubo;
- utilizando condicionadores de escoamento;
- utilizando medição multi-trajecto com técnicas de integração que satisfaçam as condições locais;
- calibrações de escoamento sob condições similares às condições locais.

Fatores Relacionados com a Geometria

Incertezas em D e L causam constantes incertezas percentuais na vazão e velocidade diretamente proporcionais aos erros em D e L . Incertezas em d causam constantes incertezas percentuais na velocidade de mesmo valor às incertezas percentuais em d .

A incerteza é influenciada por:

- método de determinação de D e redondezas;
- precisão da medição;

- expansão da seção de medição devido a pressão e temperatura;

A incerteza pode ser reduzida por:

- utilização de método apropriado para determinação de D , tendo como bom exemplo o volumétrico
- usinagem precisa da redondeza do tubo de medição;
- utilização de ferramentas precisas para as medições geométricas;
- compensação para a expansão da seção de medição devido aos efeitos de temperatura e pressão;
- calibração de escoamento sob condições similares às condições locais.

Fatores Relacionados com a Detecção de Sinal.

As medições de velocidade podem ser consideravelmente influenciadas quando o sinal acústico se torna falho. A detecção do sinal então se torna progressivamente difícil, o que pode induzir a incertezas nas medições de tempo de trânsito, reduzindo a precisão da medida. Isso também pode conduzir a inconsistências no reconhecimento do ponto de temporização correto devido a mudanças da amplitude recebida, forma de onda distorcida ou ruídos. Entretanto, sinais corrompidos podem ser rejeitados utilizando-se testes apropriados de validação. As três causas seguintes de falha de sinal podem ser encontradas: problemas elétricos, problemas induzidos de escoamento e problemas acústicos.

Mais especificamente:

- ruídos elétricos;
- escoamento secundário (fluxo cruzado e em redemoinho);
- seção de medição com múltiplas fases ou materiais;
- agentes contaminadores nos transdutores e nas redondezas da área do transdutor;
- extremos gradientes de densidade na seção de medição;

- turbulência excessiva;
- ruído ambiental excessivo (fluxo gerado ou por origens externas como válvulas de controle);
- próprio ruído gerado;
- instalações próximas a jusante de válvulas que tornem o escoamento crítico devem ser evitadas.

Geralmente os problemas são mais bem identificados por auto-suficiência de diagnósticos, auto-analisando as indicações de suas características e alarmes. Problemas com escoamento induzido são mais facilmente superados com a escolha cuidadosa da seção de medição e controle das condições do fluido.

Os problemas acústicos são melhores resolvidos com a geração de um alto sinal para a taxa de ruído. Um fundo de ruídos aleatórios (elétricos, escoamento induzido, acústicos) vão gerar dados fora da média. Ruídos auto-gerados podem ser mais difíceis de se detectar e podem não sair da média, causando assim incertezas de temporização nas medições do tempo de trânsito.

Fatores Relativos a Medição e Processamento do Tempo.

As incertezas em t_1 , t_2 e Δt são influenciadas por:

- técnica de detecção do sinal;
- método da medição do tempo (tempo de trânsito, alternância de frequência),
- resolução do tempo;
- estimativa de tempo em meios não fluidos, incluindo o tempo de retardo nos cabos, componentes eletrônicos, transdutores e parede do tubo;
- precisão computacional interna;
- influência das condições ambientais nos componentes eletrônicos;
- incertezas de temporização causados por escoamento induzido (turbulência, redemoinhos e pulsações);

- tempo de retardo causado pela parte interna do transdutor.

As incertezas podem ser reduzidas por:

- isolamento do tubo de medição para evitar gradientes de temperatura;
- checando o zero nas condições locais de operação.

3.2.7 – Calibração

3.2.7.1 – Calibração a Seco

Parâmetros Geométricos:

Para se obter alta precisão, o valor de D precisa ser a média do diâmetro interno ao longo do tubo de medição. O diâmetro interno médio precisa ser a média aritmética das medições de no mínimo doze diâmetros, ou quatro diâmetros posicionados aproximadamente em ângulos equalizados a cada outro, distribuídos em cada uma das três seções cruzadas eventualmente distribuídas através do comprimento do tubo de medição contendo todos os transdutores. O diâmetro não deve diferir de mais de 0,3% da média dos 12 diâmetros.

Temporização do Tempo de Retardo:

Os tempos de retardo de podem ser medidos por um correto ajuste do módulo eletrônico e transdutores.

Um método, entre outros, é a montagem de dois transdutores em uma célula de teste. A distância entre os transdutores é precisamente medida. A célula de teste é preenchida com um fluido, ao qual a velocidade do som é conhecida. Nesta célula de teste, uma condição de escoamento em descanso é necessária.

OBSERVAÇÃO: Uma mudança no tempo de retardo não causa uma incerteza do zero, mas uma troca de transdutores pode ocasionar uma incerteza do zero devido à mudança de orientação ou mudança da frequência do transdutor.

O tempo de trânsito momentâneo dos sinais no fluido pode ser calculado pelas equações (2) e (3). O tempo de trânsito para os sinais de “montante” (t_1) e para “jusante” (t_2) são equalizados (escoamento em descanso) e também podem ser calculados. O sistema de medição ultra-sônica fornece os tempos de trânsito (t_1') e (t_2') que incluem o tempo de retardo na eletrônica, transdutores, cabos, etc. Estes tempos de retardo são facilmente calculados a partir da diferença de $t_1' - t_1$ e $t_2' - t_2$.

Este método requer o conhecimento preciso da velocidade do som no fluido que preenche a célula de teste. Qualquer incerteza na velocidade do som afeta a boa operação do medidor de vazão. Isto causa uma alternância sistemática da curva operacional, desde que incertezas na velocidade do som causam um desajuste sistemático nos tempos de retardo aplicados. O mesmo método pode ser utilizado para teste de transdutores e em campo como uma checagem de calibração inicial

OBSERVAÇÃO: Deve ser estabelecido que este teste requer equilíbrio térmico, um fluido muito bem conhecido (especialmente para gases), precisa medição linear, etc.

Outro método para determinação do tempo de retardo na eletrônica, cabos e transdutores consiste em um ajuste no qual os tempos de trânsito de um par de transdutores pode ser medido em dois comprimentos de trajeto diferentes, (L_a) e (L_b), em condições semelhantes. O medidor ultra-sônico irá medir os tempos de trânsito (t_a') e (t_b') que incluem para ambos os comprimentos equalizados, o tempo de retardo equalizado t_d . Este método não requer o conhecimento da velocidade do som no fluido, ainda que este seja calculado.

Distribuição de Velocidades:

A – Fator k_h :

O fator k_h pode ser calculado, baseado no número de Reynolds, no perfil de escoamento assumido e na técnica de integração usada. Entretanto, incertezas nos fatores de

correção podem causar não linearidade e/ou incerteza sistemática. Estas incertezas não são considerados na calibração a seco.

O fator k_h é mais sensível a incertezas quando a velocidade de fluido $\bar{v}$ é medida em somente um trajeto acústico.

B – Peso da Medição:

No método multi-trajetos, o número de cordas, posicionamento das cordas e a técnica de integração utilizada reduzem as incertezas de medição consideravelmente, assim como o efeito das mudanças no perfil de escoamento.

3.2.7.2 – Calibração de Escoamento

Em alguns casos a calibração de escoamento é ditada pela aplicação, metrologia ou requerimentos legais. Qualquer calibração de escoamento tem um grau de incerteza, dependendo do tipo de fluido, métodos de calibração e o tipo de facilidades para calibração. Dois principais métodos de calibração de escoamentos são utilizados para testar a performance do medidor:

- calibração de escoamento em laboratório;
- calibração de escoamento em campo (não comum para gases).

Uma calibração do escoamento pode ser usada para reduzir incertezas que ainda prevalecem após uma calibração seca.

Usualmente uma calibração do escoamento resulta em um ajuste de uma série de incertezas sistemáticas como função das vazões, o que pode ser usado para se corrigir a saída do medidor. A calibração deve ser executada de modo a assegurar que o teste não influencie o resultado dos testes padrões e devem ser em condições mais próximas possíveis à instalação de referência. No mínimo, as recomendações dos fabricantes devem ser observadas.

Laboratório de Calibração de Escoamento

Para melhorar a precisão, a calibração deve ser realizada em um bom laboratório de calibração e de acordo com métodos reconhecidos por normas internacionais (ex: ISO 4185, ISO 8316, ISO 9300). A calibração deve ser feita em um número estatisticamente significativo de séries e sobre faixas de vazão apropriadas. A precisão do medidor de vazão é determinada pelas incertezas estatísticas e sistemáticas associados às medições em laboratório.

3.2.7.3 – Calibração de Vazão em Campo

Os efeitos das instalações em campo sobre o medidor de vazão podem ser corrigidos com a calibração em campo ou com uma simulação em laboratório das condições de campo. A calibração deve ser proferida com o número de Reynolds simulando o mais próximo número Reynolds encontrado na situação de campo.

3.2.8 - Custo

O custo aproximado no Brasil de um medidor do tipo ultra-sônico portátil, princípio tempo de trânsito, é da ordem de US\$13.000,00. O custo operacional é praticamente insignificante, necessitando apenas de gel (geralmente graxa de silicone) de alto vácuo para fixação dos transdutores. Um tubo de 200g garante a utilização em aproximadamente 100 campanhas de aferição e tem o custo em torno de US\$80.

3.3 – Horímetro

O horímetro tecnicamente não passa de um cronômetro adaptado para medir o tempo de funcionamento de determinados equipamentos ou alimentação elétrica. A invenção do horímetro, excluindo-se sua função de mero cronômetro, se confunde com a invenção do wattímetro e o medidor de ampére-hora, tendo como maiores diferenças simplesmente a escala e unidade de apresentação. A primeira informação precisa da utilização destes equipamentos data do início da década de 1880, quando Thomas Duncan desenvolveu para a Fort Wayne Electric Company o primeiro aparelho de mensuração de horas/potência. (fonte: www.watthourmeters.com/fortwayne/)

Oliver B. Shallenberger desenvolveu para a Westinghouse Electric (& Mfg.) Co. (1886-1990), que posteriormente comprou os direitos de patente de Duncan, o primeiro medidor de ampére-hora.

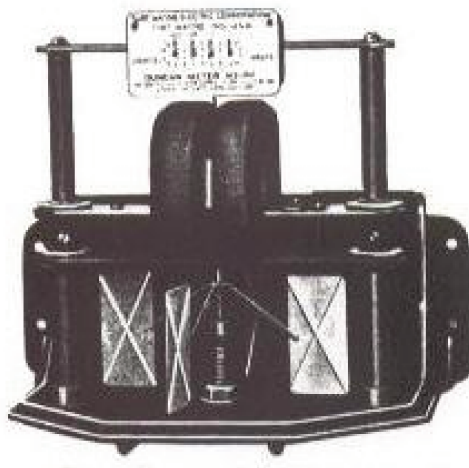


Figura 14 – Um dos primeiros wattímetros e medidores de ampére-hora



Figura 15 – Horímetros mecânicos e digitais

Os horímetros atuais pouco diferem dos primeiros desenvolvidos, a não ser por seu tamanho e precisão, devido ao desenvolvimento de materiais mais leves e confiáveis. Alguns passaram a ser digitais e/ou com circuito de controle por cristal de quartzo (Paul Davis Automation, 2003 e Redington Counters, 2003).

A precisão dos horímetros varia muito, desde desvios de $\pm 0,003\%$ (± 15 minutos por ano) a $\pm 0,1\%$ nos que utilizam cristal de quartzo, a valores entre $\pm 0,5\%$ a $\pm 2\%$ nos mecânicos sem quartzo, segundo os fabricantes. A alimentação varia de 6 a 48Vcc e 90 a 380Vca, com frequências de 50 ou 60Hz. Como é um equipamento que atualmente não exige alta tecnologia para sua fabricação, além de ser produzido em larga escala em todo o mundo, pode ser considerado um equipamento de custo relativamente baixo, variando de US\$8 a US\$80, de acordo com sua precisão, fabricante, acabamento, entre outros. A maioria dos mecânicos a quartzo oscila na faixa dos US\$15.

3.4 – Outros Medidores de Vazão Utilizados para Água Bruta

Clayton (2003) sugere, além do medidor ultra-sônico, outros tipos de medidores que podem ser utilizados para mensurar vazões e/ou volumes de água bruta. A Tabela 1 apresenta estes medidores, suas vantagens e desvantagens e tipos de aplicação.

Tabela 1 – Medidores de Vazão

Tipo	Vantagens	Desvantagens	Indústrias Primárias	Aplicação
Pressão diferencial baseada em placa de orifício	Baixo custo inicial, tecnologia muito conhecida, facilidade de utilização	Sujeita a plugagem de acessórios, causa perda de carga	Química, petróleo e gás, refinarias, energia	Líquidos Gases
Magnético	Precisão, sem perda de carga, medição bi-direcional, utilizável em grandes diâmetros	Requer fluidos condutores, eletrodos sujeitos a oxidação e incrustação	Química, água e esgoto, papel, alimentos e bebidas	Líquidos
Coriolis	Alta precisão	Sensível a vibrações, alto custo inicial, não cambiável para grandes diâmetros	Química, papel, alimentos e bebidas, refinarias	Líquidos Gases
Canal Aberto	Vários métodos possíveis, baixo custo de instalação, tecnologia conhecida	Sujeito a obstruções, precisão variável de acordo com o tipo	Química, água e esgoto, papel, refinarias	Líquidos
Deslocamento Positivo	Precisão, wide rangeability	Deve ter instalação fixa, uso limitado em grandes diâmetros, requer escoamento sem turbulências	Química, petróleo e gás, refinarias, papel	Líquidos Gases
Turbina	Precisão, tecnologia aprovada e bem aceita	Tem de ter instalação fixa, altas vazões podem causar danos	Água e esgoto, química, petróleo e gás, refinarias	Líquidos Gases
Vortex	Precisão, facilidade de instalação	Vibrações afetam a precisão	Química, papel, alimentos e bebidas, refinarias	Líquidos Gases
Ultra-sônico	Baixa manutenção, não-intrusivo, cambiável para grandes diâmetros, facilidade de instalação, bi-direcional	Alto custo inicial, alguns modelos necessitam de fluidos com baixo índice de impurezas	Água e esgoto, química, petróleo e gás, refinarias	Líquidos Gases

Fonte: Clayton (2003)

Cabe lembrar que Clayton (2003) não menciona diretamente a utilização destes medidores com água bruta, mas levando-se em conta as indústrias a que se destinam, como de água e esgoto, por exemplo, pode-se deduzir que sua utilização com água bruta é viável. Os medidores destinados a indústrias de água e esgoto citados na Tabela 1 serão citados adiante, em conjunto com outros tipos de medidores.

3.4.1 – Tipo Turbina de Inserção

Os medidores do tipo turbina de inserção têm um desempenho razoável para a utilização com água bruta. Seu princípio de funcionamento básico consiste de uma turbina com materiais magnéticos em suas pás que ao se deslocarem emitem pulsos para um sensor que os retransmite para uma unidade conversora. Os pulsos são emitidos em velocidade proporcional à velocidade do fluido. A unidade conversora é previamente configurada de acordo com o diâmetro da tubulação e indica a vazão e o volume acumulado.

Tais medidores têm desvio de precisão variando de ± 1 a $\pm 5\%$ e como vantagens apresentam o custo acessível (em torno de US\$ 1000, no Brasil, com conversor eletrônico) e a facilidade de manutenção. (fontes: www.seametrics.com e www.signet.com)

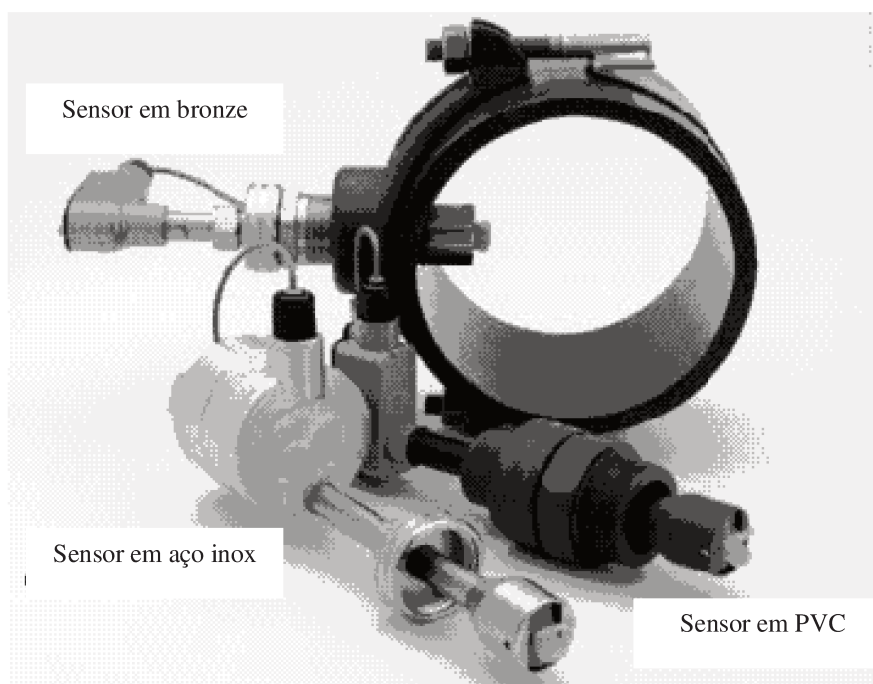


Figura 16 – Medidor tipo turbina de inserção (fonte: www.seametrics.com)

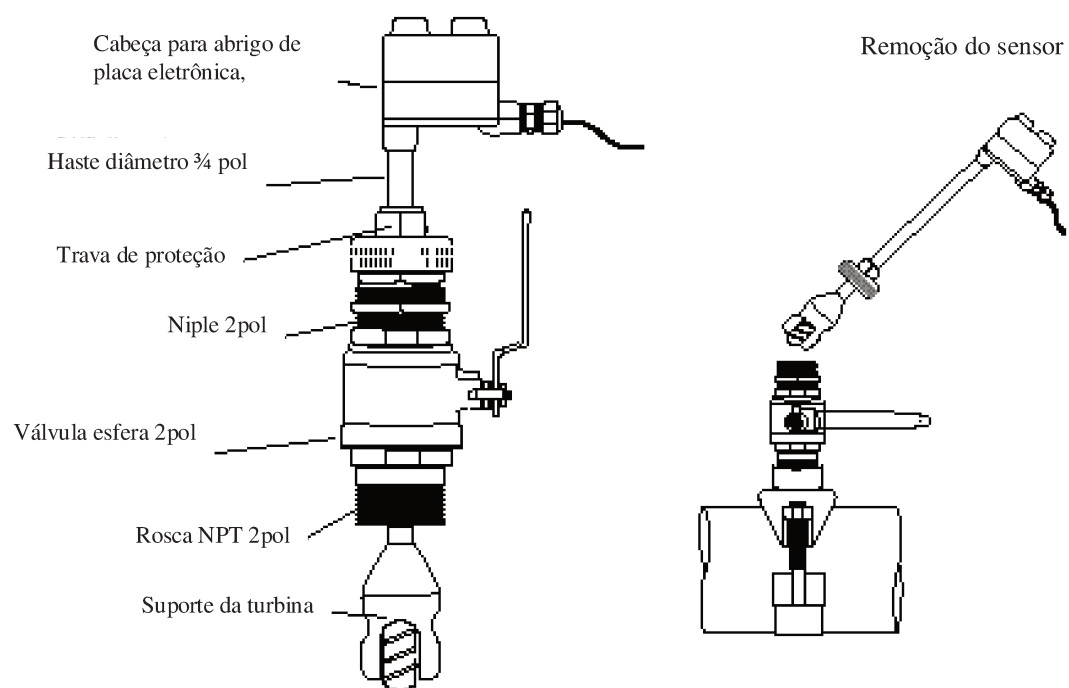


Figura 17 - Medidor tipo turbina de inserção – descrição e esquema de instalação

(fonte: www.seametrics.com)

3.4.2 – Combinações ou Medição Indireta

Medidores eletrônicos de pressão diferencial são utilizados para a medição de água bruta com bons resultados, mas têm como maior dificuldade a complexidade de calibração, devendo serem sempre realizadas em laboratórios especializados.

Sua instalação deve ser extremamente cuidadosa e têm como maior desvantagem em relação aos outros medidores a necessidade de se estar dentro de uma faixa determinada (varia de acordo com fabricante) de pressão e velocidade do fluido (máxima e mínima), ou seja, em condições de pressões ou velocidades muito baixas ou muito altas, este não apresenta resultados confiáveis. Os custos variam muito de acordo com o tipo e fabricante, com média em torno de US\$1200,00, no Brasil.

3.4.3 – Medidor Proporcional

Os medidores proporcionais podem ser divididos em dois grupos: os fabricados para a utilização em tubulações voltadas ao uso para irrigação e os hidrômetros convencionais inseridos em tubulações de diâmetros superiores, como uma maneira de se reduzir os custos de aquisição (os custos destes equipamentos são da ordem de US\$500, tomando como exemplo um diâmetro nominal de 100mm, no Brasil).

No primeiro grupo encontram-se medidores ainda pouco explorados pela indústria de macromedidores, sendo que, mesmo já produzidos em escala industrial, ainda não apresentaram precisão adequada para situações como a da cobrança da água, por exemplo. Não se adaptam bem a águas com alto teor de ferro por apresentarem incrustações em seus componentes de medição, mas por outro lado demandam pouca manutenção e não interrompem o fornecimento de água. Os fabricantes declaram precisão em torno de $\pm 5\%$, sendo incluído na classe metrológica A. (fontes: www.actaris.com e www.arad.co.il - 2003)

Os medidores adaptados a partir de medidores de menor diâmetro apresentam vantagens do ponto de vista orçamental, mas tem baixo grau de confiança na utilização com água bruta. Mesmo calibrados, geralmente são instalados na parte superior de tubulações horizontais, mais suscetíveis a bolhas de ar. Necessitam de manutenção periódica para a limpeza de filtros e à medida que estes vão contendo impurezas, proporcionalmente aumenta a resistência para a passagem de água, o que o conduz a apresentar resultados de volumes totalizados inferiores aos reais.

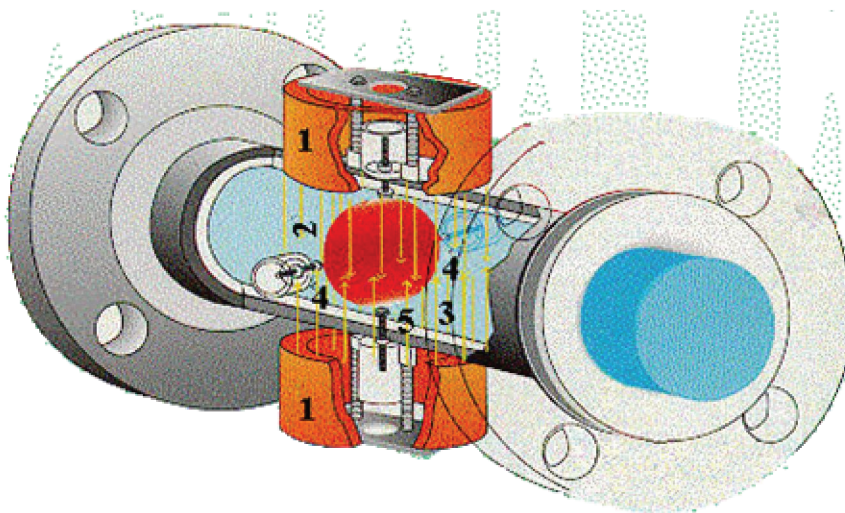


Figura 18 – Medidores Proporcionais(fontes: www.actaris.com e www.arad.co.il)

3.4.4 – Medidor Eletromagnético

Os medidores do tipo eletromagnético têm como principal vantagem a propriedade de não possuírem partes móveis, o que evita que sólidos em suspensão alterem o seu desempenho. São medidores que dependem de alimentação elétrica para operarem e são relativamente sensíveis a surtos elétricos, como descargas atmosféricas, por exemplo. O medidor funciona com uma bobina que produz um campo eletromagnético e através do nível de perturbação deste campo é possível conhecer a velocidade do fluido através de eletrodos (Figura 19). Os sinais captados são então transferidos para um conversor que visualiza os dados de vazão instantânea e volume acumulado. Têm precisão de $\pm 0,15\%$ a $\pm 0,5\%$ e podem ser do tipo de inserção ou tubo (carretel). (fonte: www.conaut.com.br, 2002).

Os custos destes equipamentos variam diretamente com o diâmetro aplicado, tomando como exemplo US\$1100 para DN 100mm e US\$2300 para DN 300mm, no Brasil.



- 1- bobinas
- 2- campo magnético gerado pelas bobinas
- 3- carcaça
- 4- eletrodos
- 5- área de perturbação captada pelos eletrodos

Figura 19 – Medidor Eletromagnético em corte



Figura 20 – Medidor Eletromagnético tipo inserção

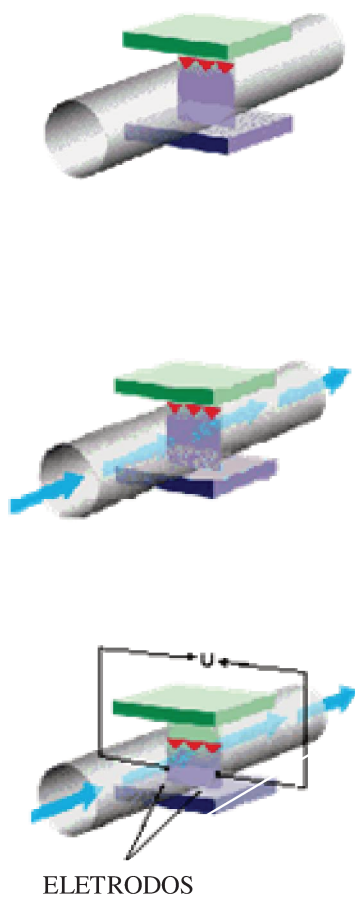


Figura 21 – Princípio de funcionamento do medidor eletromagnético

3.4.5 – Medidor Woltman

São os medidores mais utilizados pelo setor de saneamento por terem precisão satisfatória com um custo-benefício atraente. Mesmo para serem utilizados com água tratada é recomendada a utilização de filtros a montante. Apresentam precisão variada de acordo com sua classe metrológica (A, B ou C), de ± 2 a $\pm 5\%$ na faixa de vazão nominal. (fontes: www.actaris.com; www.arad.co.il). Por utilizarem filtros a montante é necessária manutenção periódica visando a limpeza destes e mesmo assim enfrentam problemas com a forte abrasão ocasionada por partículas em suspensão e desgaste de suas partes móveis, como mancais e eixos. Os mais atuais têm a vantagem de possuírem interface para leitura ótica e contador de pulsos, o que possibilita uma eventual telemetria remota. Os medidores do tipo woltman também apresentam custos diretamente proporcionais ao seu diâmetro, por exemplo: em torno de US\$ 350 para DN(Diâmetro Nominal) 100 e US\$ 650 para DN 200, no Brasil. Os filtros do tipo cesto apresentam custos em torno de US\$150, para DN 100 e US\$280 para DN 200.



Fig. 22 – Medidores tipo Woltman (fontes: www.actaris.com; www.arad.co.il)

3.5 – Considerações Finais

Apesar do mercado oferecer vários medidores que podem operar com água bruta, todos com suas vantagens e desvantagens, o medidor ultra-som se demonstra como o mais versátil, principalmente pela sua capacidade de medir vazão em diversos diâmetros, assim como tipos de material de tubulação. O principal impedimento para sua ampla utilização é o seu custo, demasiadamente elevado em relação aos demais medidores.

Os medidores tipo woltman são os mais utilizados pelas indústrias de saneamento, principalmente para efeito de cobrança, por não necessitarem de alimentação elétrica, por sua robustez, precisão aceitável ($\pm 2\%$) e custo moderado.

Os medidores tipo eletromagnético vêm sendo utilizados mais amplamente no Brasil a cada dia, principalmente pela sua alta precisão (em torno de $\pm 0,5\%$), não necessitarem de manutenção em curtos espaços de tempo e pelo fato destes já estarem sendo fabricados em território nacional, o que reduz significativamente o seu custo de aquisição.

Segundo Delmée(1983), a grande maioria dos métodos de mensuração têm suas particularidades em relação a forma de instalação, de operação, etc. sendo que a melhor escolha geralmente dependerá das condições locais.

4 – Material e Método

4.1 – Introdução

Para se obter dados confiáveis para a aplicação de horímetros, concentrou-se os estudos em campo e laboratório, gerando dados para confrontações e conclusões. Nas duas situações foi utilizado o mesmo medidor ultra-sônico devidamente calibrado em laboratório credenciado pelo Inmetro e rastreado pela RBC – Rede Brasileira de Calibração, de forma a se evitar distorções possivelmente ocasionadas pela alternância entre medidores distintos.

4.2 – Estudos de Campo

Os estudos gerais foram realizados na bacia hidrográfica do Baixo Jaguaribe, nos municípios de Russas, Limoeiro do Norte, Tabuleiro de Russas, Jaguaruana e Itaiçaba, todos no Estado do Ceará e em usuários que captam diretamente do Rio Jaguaribe para irrigação, através de moto-bombas centrífugas das mais variadas marcas e modelos. Para este trabalho foram utilizados os dados do Perímetro de Irrigação do DIJA (Distrito de Irrigação Jaguaribe Apodi), em Limoeiro do Norte. A localização do DIJA, bem como a divisão de bacias hidrográficas do Estado do Ceará encontra-se na Figura 23.

Este estudo foi limitado à área de abrangência da DIJA devido às instalações disponíveis, ao tempo exigido para a aferição, à proximidade das instalações e ao deslocamento da equipe de trabalho para efetuar as medições.



Figura 23 – Localização do DIJA e divisão das bacias Hidrográficas do Ceará

4.2.1 – Metodologia dos Estudos de Campo

Foram instalados, a partir do convênio COGERH/ANA, e a sugestão do autor, cerca de 300 horímetros em bombas de usuários (irrigação) localizados no Rio Jaguaribe a jusante do Açude Orós (este regulariza a vazão lançada no rio sempre tentando-se evitar o desperdício de água armazenada que pode chegar ao mar). Este projeto foi tido como projeto piloto para este tipo de aplicação e foi colocado em operação o início da cobrança de irrigantes pelo uso de recursos hídricos no Brasil. Deste total, cerca de 75 instalações, formadas por um perímetro de irrigação que capta água do Rio Jaguaribe e a lança em uma rede de canais gravitários foram tidas como universo para este trabalho, por serem mais estáveis (fora do perímetro de irrigação os sistemas de irrigação são alterados normalmente, em razão da substituição de culturas). Foram então realizadas novas campanhas de aferição, aonde foi instalado novamente o medidor ultrassônico em algumas instalações de campo dotadas de horímetro (Figura 24), previamente aferidas pelo mesmo tipo de medidor há mais de um ano para se obter dados de comparação.



Figura 24 - Instalação típica de horímetros em bombas

O período mínimo de um ano se deve ao fato de que os sistemas de recalque se alteram com o tempo, seja por desgaste de rotores da bomba, alteração da temperatura ambiente, qualidade da energia fornecida para a bomba (esta pode ter pequenas variações em tensão e

amperagem ao longo do tempo, por exemplo), incrustação da tubulação de recalque, diferença de cotas piezométricas por variações de nível, entre outros. Acredita-se que com este período, é possível se obter resultados conclusivos mais expressivos.

Dados de Campo:

A primeira série de dados foi coletada em novembro de 2001 e fevereiro de 2002 e os resultados, assim como características gerais dos sistemas, estão descritos na Tabela 2. Esta tabela contém também dados como material, diâmetro e espessura do tubo medido, espaçamento entre transdutores e potência da bomba que recalca água por determinada tubulação.

Tabela 2 – Primeira Série de Dados de Campo

Ficha	No. da Bomba utilizada no local	Data Aferição	Material do Tubo	Diâmetro do Tubo (mm)	Espess. do Tubo (mm)	Espaçam. entre Transd. (mm)	Potência da Bomba (CV)	Vazão da Bomba (m ³ /h)	Longitude (UTM)	Latitude (UTM)
1	1	12/11/2001	PVC	77	2,0	69,0	7,5	31,0	609.364	9.427.975
2	1	12/11/2001	Aço Galv.	204	2,0	181,0	75,0	287,0	609.376	9.428.437
3	2	12/11/2001	Aço Galv.	204	2,0	181,0	75,0	252,0	609.376	9.428.437
4	1	12/11/2001	PVC	62	2,0	104,5	7,5	21,5	612.348	9.431.319
5	1	12/11/2001	Aço Carbono	521	5,0	463,0	175,0	570,0	612.342	9.431.372
6	2	12/11/2001	Aço Carbono	521	5,0	463,0	175,0	540,0	612.342	9.431.372
7	3	12/11/2001	Aço Carbono	521	5,0	463,0	100,0	300,0	612.342	9.431.372
8	4	12/11/2001	Aço Carbono	521	5,0	463,0	100,0	300,0	612.342	9.431.372
9	5	12/11/2001	Aço Carbono	521	5,0	463,0	100,0	300,0	612.342	9.431.372
10	1	13/11/2001	Aço Carbono	169	3,0	152,0	7,5	37,4	605.128	9.425.529
11	1	13/11/2001	PVC	114	2,0	102,0	20,0	76,5	611.671	9.424.647
12	2	13/11/2001	PVC	61	1,5	59,0	7,5	56,0	611.671	9.424.647
13	3	13/11/2001	PVC	50	1,5	47,0	2,0	12,0	611.671	9.424.647
14	1	13/11/2001	PVC	223	6,0	193,0	50,0	128,0	614.157	9.423.049
15	2	13/11/2001	PVC	80	2,0	76,0	5,0	18,0	614.157	9.423.049
16	1	13/11/2001	Aço zincado	261	3,0	233,0	75,0	241,0	609.338	9.424.582
17	2	13/11/2001	Aço zincado	261	3,0	233,0	75,0	253,0	609.338	9.424.582
18	3	13/11/2001	Aço zincado	370	4,0	370,0	200,0	450,0	609.338	9.424.582
19	4	13/11/2001	Aço zincado	261	3,0	233,0	75,0	243,0	609.338	9.424.582
20	1	13/11/2001	Aço zincado	263	2,5	234,0	75,0	263,0	610.492	9.425.940
21	2	13/11/2001	Aço zincado	154	2,0	138,0	25,0	69,0	610.492	9.425.940
22	3	13/11/2001	Aço zincado	154	2,0	138,0	25,0	72,0	610.492	9.425.940
23	4	13/11/2001	Aço zincado	263	2,5	234,0	75,0	263,0	610.492	9.425.940
24	1	13/11/2001	Aço zincado	264	2,0	235,0	75,0	274,0	607.760	9.423.852
25	2	13/11/2001	Aço zincado	264	2,0	236,0	75,0	267,0	607.760	9.423.852
26	3	13/11/2001	Aço zincado	264	2,0	237,0	75,0	261,0	607.760	9.423.852
27	1	14/11/2001	Aço zincado	266	3,0	237,0	75,0	262,0	606.699	9.425.124
28	2	14/11/2001	Aço zincado	266	3,0	237,0	75,0	282,0	606.699	9.425.124
29	3	14/11/2001	Aço zincado	266	3,0	237,0	75,0	269,0	606.699	9.425.124
30	1	14/11/2001	Aço zincado	266	3,0	237,0	75,0	251,0	607.341	9.425.796
31	2	14/11/2001	Aço zincado	369	3,0	327,0	200,0	527,0	607.341	9.425.796
32	1	14/11/2001	Aço zincado	266	3,0	237,0	75,0	271,0	609.307	9.426.429
33	2	14/11/2001	Aço zincado	266	3,0	237,0	75,0	271,0	609.307	9.426.429
34	1	14/11/2001	Aço zincado	370	3,0	327,0	-	-	608.427	9.427.027
35	2	14/11/2001	Aço zincado	266	3,0	237,0	-	-	608.427	9.427.027
36	1	14/11/2001	Aço zincado	153	3,0	137,0	75,0	261,0	610.620	9.428.666
37	2	14/11/2001	Aço zincado	153	3,0	137,0	25,0	80,0	610.620	9.428.666

Ficha	No. da Bomba utilizada no local	Data Aferição	Material do Tubo	Diâmetro do Tubo (mm)	Espess. do Tubo (mm)	Espaçam. entre Transd. (mm)	Potência da Bomba (CV)	Vazão da Bomba (m³/h)	Longitude (UTM)	Latitude (UTM)
38	3	14/11/2001	Aço zincado	153	3,0	137,0	25,0	100,0	610.620	9.428.666
39	1	14/11/2001	Aço zincado	261	3,0	233,0	40,0	170,0	612.400	9.431.108
40	2	14/11/2001	Aço zincado	261	3,0	233,0	40,0	170,0	612.400	9.431.108
41	3	14/11/2001	Aço zincado	370	3,0	328,0	200,0	475,0	612.400	9.431.108
42	4	14/11/2001	Aço zincado	357	3,0	315,0	75,0	250,0	612.400	9.431.108
43	1	14/11/2001	Aço zincado	261	3,0	233,0	75,0	240,0	613.620	9.430.562
44	2	14/11/2001	Aço zincado	261	3,0	233,0	75,0	270,0	613.620	9.430.562
45	3	14/11/2001	Aço zincado	261	3,0	233,0	75,0	250,0	613.620	9.430.562
46	1	16/11/2001	Ferro Dúctil	169	7,0	153,0	30,0	130,0	611.507	9.430.811
47	2	16/11/2001	Ferro Dúctil	169	7,0	153,0	40,0	106,0	611.507	9.430.811
48	3	16/11/2001	Ferro Dúctil	169	7,0	153,0	30,0	130,0	611.507	9.430.811
49	4	16/11/2001	Ferro Dúctil	169	7,0	153,0	40,0	186,0	611.507	9.430.811
50	5	16/11/2001	Ferro Dúctil	169	7,0	153,0	30,0	130,0	611.507	9.430.811
51	6	16/11/2001	Ferro Dúctil	169	7,0	153,0	40,0	185,0	611.507	9.430.811
52	7	16/11/2001	Ferro Dúctil	169	7,0	153,0	40,0	180,0	611.507	9.430.811
53	8	16/11/2001	Ferro Dúctil	169	7,0	153,0	40,0	147,0	611.507	9.430.811
54	9	16/11/2001	Ferro Dúctil	169	7,0	153,0	10,0	45,0	611.507	9.430.811
55	10	16/11/2001	PVC	50	3,0	45,0	2,0	10,0	611.507	9.430.811
56	1	16/11/2001	Aço zincado	153	2,0	137,0	50,0	138,0	610.582	9.428.913
57	2	16/11/2001	Aço zincado	153	2,0	137,0	50,0	122,0	610.582	9.428.913
58	1	16/11/2001	Aço zincado	153	2,0	137,0	50,0	149,0	609.756	9.428.442
59	2	16/11/2001	Aço zincado	153	2,0	137,0	50,0	108,0	609.756	9.428.442
60	1	16/11/2001	Aço zincado	261	3,0	233,0	75,0	273,0	612.061	9.428.642
61	2	16/11/2001	Aço zincado	261	3,0	233,0	75,0	276,0	612.061	9.428.642
62	3	16/11/2001	Aço zincado	261	3,0	233,0	75,0	274,0	612.061	9.428.642
63	1	16/11/2001	Aço zincado	261	3,0	233,0	75,0	252,0	610.958	9.429.654
64	2	16/11/2001	Aço zincado	261	3,0	233,0	75,0	252,0	610.958	9.429.654
65	3	16/11/2001	Aço zincado	357	3,0	316,0	100,0	578,0	610.958	9.429.654
66	4	16/11/2001	Aço zincado	357	3,0	316,0	100,0	578,0	610.958	9.429.654
67	1	06/02/2002	Aço zincado	-	-	-	175,0	402,0	610.711	9.424.137
68	2	06/02/2002	Aço zincado	-	-	-	30,0	129,0	610.711	9.424.137
69	3	06/02/2002	Aço zincado	-	-	-	175,0	402,0	610.711	9.424.137
70	1	06/02/2002	Aço zincado	203	2,5	181,0	60,0	255,0	607.887	9.422.878
71	2	06/02/2002	Aço zincado	255	2,5	225,0	75,0	240,0	607.887	9.422.878
72	3	06/02/2002	Aço zincado	203	2,5	181,0	75,0	240,0	607.887	9.422.878
73	4	06/02/2002	PVC	89	2,5	77,0	7,5	9,0	607.887	9.422.878
74	1	06/02/2002	Aço zincado	133	2,5	120,0	25,0	83,0	607.887	9.422.878
75	2	06/02/2002	PVC	103	1,5	89,0	10,0	13,5	607.887	9.422.878
76	1	06/02/2002	PVC	76	1,5	66,0	7,5	25,0	608.567	9.424.432
77	1	06/02/2002	PVC	76	1,5	66,0	7,5	42,0	610.351	9.426.031
78	1	06/02/2002	PVC	76	1,5	66,0	10,0	45,0	610.491	9.425.975
79	1	06/02/2002	PVC	76	1,5	66,0	3,0	10,0	610.491	9.425.975
80	1	06/02/2002	PVC	76	1,5	66,0	2,0	29,0	610.333	9.426.485
81	1	06/02/2002	PVC	76	1,5	66,0	2,0	25,0	610.354	9.426.440
82	1	06/02/2002	PVC	60	1,5	102,0	2,0	5,9	608.442	9.426.959
83	1	06/02/2002	PVC	60	1,5	102,0	2,0	5,9	608.442	9.426.959
84	1	06/02/2002	PVC		1,5		25,0	80,0	608.442	9.426.959
85	2	06/02/2002	PVC	60	1,5	102,0	2,0	5,9	608.442	9.426.959
86	1	06/02/2002	PVC	76	1,5	66,0	2,0	10,0	609.271	9.427.267
87	1	06/02/2002	FoFo	100	3,0	81,0	10,0	46,5	609.240	9.427.435
88	2	06/02/2002	FoFo	100	3,0	81,0	12,0	63,0	609.240	9.427.435
89	3	06/02/2002	PVC	76	1,5	66,0	2,0	10,0	609.240	9.427.435
90	1	06/02/2002	FoGo	117	3,0	104,0	20,0	60,0	609.485	9.426.984
91	2	06/02/2002	PVC	89	2,0	77,0	10,0	36,0	609.485	9.426.984
92	3	06/02/2002	FoGo	61	3,0	53,0	7,5	30,0	609.299	9.427.184
93	4	06/02/2002	Aço zincado	90	1,5	81,0	10,0	37,3	609.248	9.427.395
94	1	06/02/2002	PVC	76	1,5	66,0	2,0	14,0	610.633	9.428.674
95	1	06/02/2002	PVC	60	1,5	102,0	7,5	30,0	610.957	9.429.646
96	1	06/02/2002	PVC	76	1,5	66,0	7,5	20,0	612.349	9.431.096
97	1	06/02/2002	PVC	114	1,5	97,0	25,0	62,0	610.749	9.429.827

A segunda série de dados de campo foi levantada em maio de 2003, um ano e quatro meses após a primeira série, e seus resultados podem ser visualizados na Tabela 3.

Tabela 3 – Segunda Série de Dados de Campo

Ficha	No. da Bomba utilizada no local	Data Aferição	Diâmetro do Tubo (mm)	Potência da Bomba (CV)	Vazão da Bomba (m ³ /h)
4	1	15/05/2003	62	7,5	27
14	1	15/05/2003	223	50	126
15	2	15/05/2003	80	5	17,5
16	1	15/05/2003	261	75	225
17	2	15/05/2003	261	75	224
18	3	15/05/2003	370	200	451
19	4	15/05/2003	261	75	229
20	1	15/05/2003	263	75	258
22	3	15/05/2003	154	25	73
23	4	15/05/2003	263	75	261
27	1	15/05/2003	266	75	255
28	2	15/05/2003	266	75	272
29	3	15/05/2003	266	75	258
36	1	15/05/2003	153	75	258
37	2	15/05/2003	153	25	78
38	3	15/05/2003	153	25	96
49	4	15/05/2003	169	40	82
50	5	15/05/2003	169	30	118
51	6	15/05/2003	169	40	51
52	7	15/05/2003	169	40	130
53	8	15/05/2003	169	40	61
54	9	15/05/2003	169	10	42
55	10	15/05/2003	50	2	9,8
56	1	15/05/2003	153	50	142
57	2	15/05/2003	153	50	124
58	1	15/05/2003	153	50	179
59	2	15/05/2003	153	50	167
67	1	15/05/2003	522	175	603
68	2	15/05/2003	522	30	125
69	3	15/05/2003	522	175	603
87	1	15/05/2003	100	10	46
88	2	15/05/2003	100	12	50
90	1	15/05/2003	117	20	55
91	2	15/05/2003	89	10	34
92	3	15/05/2003	61	7,5	29
93	4	15/05/2003	90	10	34

Cabe ressaltar que ambas as campanhas foram realizadas com o mesmo medidor ultrassônico, Panametrics PT-868.

A instalação do horímetro nas bombas (em caixas de proteção de alumínio devidamente lacradas para garantir a inviolabilidade do sistema) e a aferição do sistema leva em torno de 1 hora e não necessariamente é preciso paralisar o bombeamento. As caixas de proteção dos

horímetros são instaladas preferencialmente diretamente nas bombas, de forma que qualquer mobilização ou modificação destas seja evidenciada pela quebra do lacre de segurança. Não se inibe ao usuário a quebra dos lacres, desde que esta seja justificada (manutenção, defeito, mobilização, etc.)

4.3 – Ensaios em Laboratório

Para a análise do sistema de medição indireta por horímetros, foi construída uma bancada de ensaios na DPM Engenharia, em Fortaleza - CE, com um circuito fechado de recirculação de água de pequenas dimensões, composto por:

- Bomba tipo booster com potência de 0,5 CV.
- Tubulação e conexões PVC DN 1,5” e 3” com válvulas tipo esfera DN 3”.
- Reservatório em PVC transparente com capacidade de 20 litros.
- Horímetro Turotest Quartzo com precisão $\pm 0,005\%$, segundo o fabricante.
- Medidor de vazão ultra-sônico Panametrics PT 878 com precisão de $\pm 1\%$.
- Medidor de vazão tipo turbina de inserção George Fischer com precisão de $\pm 2\%$.

O esquema de instalação do circuito fechado para os ensaios é apresentado na Figura 25.

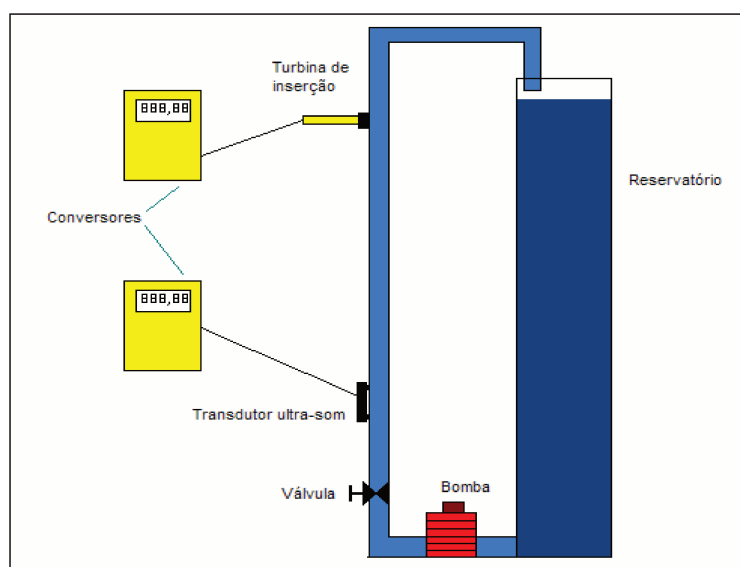


Figura 25 – Esquema da instalação de ensaio do circuito fechado

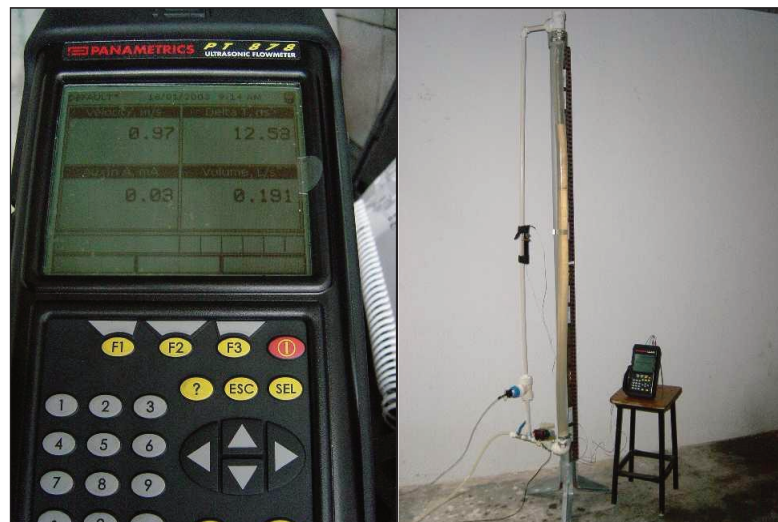


Figura 26 – Fotos do circuito fechado de ensaios

A Figura 26 demonstra fotos do circuito fechado de ensaios em laboratório. O horímetro foi ligado diretamente ao cabo de alimentação energética da bomba de forma que, toda vez que o sistema fosse ligado, o mesmo se acionasse automaticamente.

Na linha de recalque foi instalada uma válvula tipo esfera de fecho rápido para que fosse possível executar os ensaios com diversas faixas de vazões.

Outra bancada foi instalada nas instalações da Grypho Engenharia Ltda., também em Fortaleza – CE, aonde foi analisada a precisão dos horímetros. Os horímetros foram dispostos lado a lado e ligados à mesma fonte de alimentação elétrica conforme Figura 27.



Figura 27 – Esquema da instalação de ensaio dos horímetros

4.3.1 – Metodologia dos Ensaios

4.3.1.1 – Circuito Fechado

Foi realizada a aferição do sistema com medidor ultra-sônico Panametrics PT 878. De posse dos dados de aferição, efetivou-se a operação do sistema com acionamento simultâneo da bomba, horímetro e totalizador de volumes do medidor tipo turbina de inserção e ultra-sônico, pelo período de 24 horas. Os dados levantados estão apresentados no Capítulo 5 - Resultados.

Cabe ressaltar que o medidor tipo turbina de inserção foi aferido “in situ” tendo como padrão o mesmo medidor ultra-sônico utilizado para os ensaios.

4.3.1.2 - Horímetros

Foi realizada a leitura inicial de cada um dos horímetros (total de 10 unidades) e ativada sua energização simultaneamente ao disparo de um cronômetro digital com precisão $\pm 0,005\%$. Após 168 horas, foi realizada nova leitura nos horímetros e calculados seus desvios de precisão em relação ao cronômetro. Os dados levantados estão apresentados no Capítulo 5 - Resultados.

5 – Resultados

5.1 – Introdução

5.1.1 – Ensaio em Laboratório

De acordo com a metodologia apresentada no Capítulo 4 foram feitos os testes em laboratório. A Tabela 4 apresenta o comparativo entre as vazões obtidas empregando o medidor ultra-som e as vazões obtidas através do medidor tipo turbina ou horímetro, operados em linha na instalação de ensaios. Verificou-se uma variação quase insignificante em relação ao desvio padrão, o que demonstra que em laboratório as condições se aproximam das ideais e os dois equipamentos apresentam a vazão efetiva.

Tabela 4 – Ensaio do Circuito Fechado

Relógio Interno do Ultra-Som (h)	Vazão Ultra-som (m ³ /h)	Vazão Turbina de Inserção (m ³ /h)
1	1,51	1,53
2	1,52	1,56
3	1,52	1,58
4	1,53	1,49
5	1,52	1,58
6	1,53	1,53
7	1,54	1,54
8	1,53	1,57
9	1,53	1,58
10	1,52	1,55
11	1,53	1,54
12	1,54	1,57
13	1,54	1,51
14	1,53	1,5
15	1,54	1,52
16	1,53	1,49
17	1,53	1,57
18	1,52	1,56
19	1,53	1,55
20	1,54	1,5
21	1,53	1,53
22	1,54	1,48
23	1,54	1,58
24	1,54	1,57
Média:	1,530	1,541
Desvio Padrão:	0,009	0,033

A seguir, foram coletados os dados do ensaio com horímetros. Foram selecionados 10 horímetros, da mesma procedência, e colocados em linha para se avaliar o seu funcionamento. A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos com a bateria de 10 horímetros interligados e acionados simultaneamente ao disparo de um cronômetro de precisão IWC-500.

Tabela 5 – Ensaio dos Horímetros

Horímetro	Leitura Final (horas)
1	167,99
2	168,01
3	168,01
4	168,00
5	168,01
6	167,99
7	168,00
8	168,03
9	168,00
10	168,02

Aparentemente, os desvios em relação ao padrão são de pequena ordem. Os cálculos relativos às incertezas são apresentados no item 5.3.2.

5.1.2 – Ensaios em Campo

De acordo com a metodologia descrita no Capítulo 4, foram realizados os ensaios em campo nas instalações definidas preliminarmente. Na Tabela 6 são confrontados diretamente os resultados obtidos através das aferições realizadas na primeira e segunda campanhas de campo, lembrando que foram realizadas com um intervalo de aproximadamente 1 ano e 4 meses.

Tabela 6 – Resultados das campanhas de aferição no campo

Ficha	No. da Bomba utilizada no local	Data Aferição 1	Data Aferição 2	Diâmetro do Tubo (mm)	Potência da Bomba (CV)	Vazão 1 da Bomba (m3/h)	Vazão 2 da Bomba (m3/h)	Diferença entre 1 e 2 (%)
4	1	12/11/2001	15/05/2003	62	7,5	21,5	27	25,58
14	1	13/11/2001	15/05/2003	223	50	128	126	-1,56
15	2	13/11/2001	15/05/2003	80	5	18	17,5	-2,78
16	1	13/11/2001	15/05/2003	261	75	241	225	-6,64
17	2	13/11/2001	15/05/2003	261	75	253	224	-11,46
18	3	13/11/2001	15/05/2003	370	200	450	451	0,22
19	4	13/11/2001	15/05/2003	261	75	243	229	-5,76
20	1	13/11/2001	15/05/2003	263	75	263	258	-1,90
22	3	13/11/2001	15/05/2003	154	25	72	73	1,39
23	4	13/11/2001	15/05/2003	263	75	263	261	-0,76
27	1	14/11/2001	15/05/2003	266	75	262	255	-2,67
28	2	14/11/2001	15/05/2003	266	75	282	272	-3,55
29	3	14/11/2001	15/05/2003	266	75	269	258	-4,09
36	1	14/11/2001	15/05/2003	153	75	261	258	-1,15
37	2	14/11/2001	15/05/2003	153	25	80	78	-2,50
38	3	14/11/2001	15/05/2003	153	25	100	96	-4,00
49	4	16/11/2001	15/05/2003	169	40	186	82	-55,91
50	5	16/11/2001	15/05/2003	169	30	130	118	-9,23
51	6	16/11/2001	15/05/2003	169	40	185	51	-72,43
52	7	16/11/2001	15/05/2003	169	40	180	130	-27,78
53	8	16/11/2001	15/05/2003	169	40	147	61	-58,50
54	9	16/11/2001	15/05/2003	169	10	45	42	-6,67
55	10	16/11/2001	15/05/2003	50	2	10	9,8	-2,00
56	1	16/11/2001	15/05/2003	153	50	138	142	2,90
57	2	16/11/2001	15/05/2003	153	50	122	124	1,64
58	1	16/11/2001	15/05/2003	153	50	149	179	20,13
59	2	16/11/2001	15/05/2003	153	50	108	167	54,63
67	1	06/02/2002	15/05/2003	522	175	588	603	2,55
68	2	06/02/2002	15/05/2003	522	30	129	125	-3,10
69	3	06/02/2002	15/05/2003	522	175	590	603	2,20
87	1	06/02/2002	15/05/2003	100	10	46,5	46	-1,08
88	2	06/02/2002	15/05/2003	100	12	63	50	-20,63
90	1	06/02/2002	15/05/2003	117	20	60	55	-8,33
91	2	06/02/2002	15/05/2003	89	10	36	34	-5,56
92	3	06/02/2002	15/05/2003	61	7,5	30	29	-3,33
93	4	06/02/2002	15/05/2003	90	10	37,3	34	-8,85

Nota: Q₁ = Vazão referente à aferição realizada em 11/2001 e 02/2002(Primeira série de dados);
Q₂ = Vazão referente à aferição realizada em 05/ 2003 (Segunda série de dados)

A Figura 28 mostra a instalação dos equipamentos nas aferições realizadas em campo.



A



B



C

Figura 28 - Aferição ultra-sônica de sistema de recalque

Para poder realizar uma correta análise dos resultados obtidos, os dados referentes às aferições em campo foram separados em dois grupos considerando as instalações com bombas com filtro a jusante(micro-aspersão ou gotejamento) e com bombas para pivôs de irrigação, que correspondem a bombas sem filtro.

Na Tabela 7 são indicados somente os resultados relativos a sistemas com filtro em linha. Na tabela são indicados os valores da vazão na primeira e segunda série de medições, assim como também a diferença percentual entre as duas leituras.

Tabela 7 - Comparativo entre as duas séries de aferições em campo com filtro

Ficha	No. da Bomba utilizada no local	Data Aferição 1	Data Aferição 2	Vazão 1 da Bomba (m3/h)	Vazão 2 da Bomba (m3/h)	Diferença entre Q_1 e Q_2 (%)
4	1	12/11/2001	15/05/2003	21,5	27	25,58
14	1	13/11/2001	15/05/2003	128	126	-1,56
15	2	13/11/2001	15/05/2003	18	17,5	-2,78
49	4	16/11/2001	15/05/2003	186	82	-55,91
50	5	16/11/2001	15/05/2003	130	118	-9,23
51	6	16/11/2001	15/05/2003	185	51	-72,43
52	7	16/11/2001	15/05/2003	180	130	-27,78
53	8	16/11/2001	15/05/2003	147	61	-58,50
54	9	16/11/2001	15/05/2003	45	42	-6,67
55	10	16/11/2001	15/05/2003	10	9,8	-2,00
56	1	16/11/2001	15/05/2003	138	142	2,90
57	2	16/11/2001	15/05/2003	122	124	1,64
58	1	16/11/2001	15/05/2003	149	179	20,13
59	2	16/11/2001	15/05/2003	108	167	54,63
87	1	06/02/2002	15/05/2003	46,5	46	-1,08
88	2	06/02/2002	15/05/2003	63	50	-20,63
90	1	06/02/2002	15/05/2003	60	55	-8,33
91	2	06/02/2002	15/05/2003	36	34	-5,56
92	3	06/02/2002	15/05/2003	30	29	-3,33

Nota-se claramente uma grande desigualdade de resultados entre as campanhas, chegando a valores da ordem de até -72,43%. Analisando esta situação, pode ser constatado que isso se deu pela falta de limpeza e manutenção dos filtros, que ocasiona uma elevada perda de carga na tubulação e conseqüente redução da vazão.

De acordo com o que foi dito anteriormente, na Tabela 8 são apresentados somente os resultados das aferições em campo relativos aos sistemas sem filtro em linha.

Tabela 8 - Comparativo entre as duas séries de aferições em campo sem filtro

Ficha	No. da Bomba	Data Aferição 1	Data Aferição 2	Diâmetro do Tubo (mm)	Potência da Bomba (CV)	Vazão 1 da Bomba (m3/h)	Vazão 2 da Bomba (m3/h)	Diferença entre 1 e 2 (%)
16	1	13/11/2001	15/05/2003	261	75	241	225	-6,64
17	2	13/11/2001	15/05/2003	261	75	253	224	-11,46
18	3	13/11/2001	15/05/2003	370	200	450	451	0,22
19	4	13/11/2001	15/05/2003	261	75	243	229	-5,76
20	1	13/11/2001	15/05/2003	263	75	263	258	-1,90
22	3	13/11/2001	15/05/2003	154	25	72	73	1,39
23	4	13/11/2001	15/05/2003	263	75	263	261	-0,76
27	1	14/11/2001	15/05/2003	266	75	262	255	-2,67
28	2	14/11/2001	15/05/2003	266	75	282	272	-3,55
29	3	14/11/2001	15/05/2003	266	75	269	258	-4,09
36	1	14/11/2001	15/05/2003	153	75	261	258	-1,15
37	2	14/11/2001	15/05/2003	153	25	80	78	-2,50
38	3	14/11/2001	15/05/2003	153	25	100	96	-4,00
67	1	06/02/2002	15/05/2003	522	175	588	603	2,55
68	2	06/02/2002	15/05/2003	522	30	129	125	-3,10
69	3	06/02/2002	15/05/2003	522	175	590	603	2,20
93	4	06/02/2002	15/05/2003	90	10	37,3	34	-8,85

Nota-se claramente a diferença entre os resultados das vazões obtidas relativos aos sistemas com filtro e sem filtro. Neste caso, sem filtro em linha, as diferenças percentuais chegam a -11,46 no máximo. Desta forma se justifica então uma análise individual de cada grupo de dados, assim como o cálculo de suas incertezas.

5.2 - Análise dos Resultados

A intenção inicial era de se realizar as aferições de todos os pontos inicialmente aferidos na primeira série e dotados de horímetros. Mas, pôde ser notado que algumas bombas foram substituídas e outras simplesmente retiradas, o que não permitiu que o universo de dados fosse mais amplo. Nota-se uma variação muito elevada entre os resultados relativos às bombas de sistemas que contam com filtros. A falta de manutenção destes ocasiona perda de carga elevada na linha, prejudicando a performance das bombas.

Deve sempre se levar em conta a experiência do operador do medidor ultra-som porque uma medida ou fixação de transdutores realizada de forma errada pode alterar significativamente os resultados finais. Procurou-se sempre realizar as campanhas de modo que todo o lançamento de dados de programação do medidor e leituras de réguas fossem revisados criteriosamente.

O intervalo de aproximadamente 1 ano e quatro meses entre a primeira e a segunda série de levantamento de dados de campo em conjunto com a grande variação de vazões verificada em alguns casos, como o da ficha 17, com -11,46%, reforça a tese de que as campanhas de aferição têm de ter uma periodicidade de aproximadamente um ano para que os resultados obtidos em relação à incerteza se confirmem. Cabe lembrar que a realização de novos ensaios poderia dar mais precisão a esta avaliação de periodicidade.

Cada aferição leva em torno de 40 minutos, fora o deslocamento entre os locais em que foram realizadas. Uma das maiores dificuldades encontradas era de se conseguir estar no local no momento em que as bombas estavam ativas, devido ao fato de parte dos irrigantes não contarem com um planejamento regular de manejo. Se houvesse uma prática controlada da aplicação de água no solo nestes casos, poderia ser melhor utilizada a disponibilidade de água, evitando desperdícios.

O Twin Platte Natural Resources District - TPNRD do estado de Nebraska, Estados Unidos, utiliza a combinação horímetros com aferição ultra-sônica para a mensuração de volumes de água bruta de usuários rurais como uma forma econômica de estimar volumes captados. Mas as semelhanças com a experiência cearense terminam por aí. O objetivo do TPNRD é prestar tais serviços com o objetivo de orientar agricultores ao manejo adequado para irrigação, não visando

o monitoramento, gestão ou cobrança dos recursos hídricos, não tendo portanto, a mesma necessidade de se conhecer melhor as incertezas da medição. No caso do Brasil, com o início da cobrança pelo uso da água, é necessário conhecer as incertezas relativas a este tipo de medição indireta de água bruta.

5.3 – Incertezas e Precisão dos Instrumentos e do Conjunto

5.3.1 - Exatidão, repetibilidade e reproduzibilidade das medições

Segundo Allen (1975) e Solazzo (2003), há uma quantidade significativa de informações que necessita ser revista antes que se possa mensurar corretamente a precisão de um equipamento. Dessa maneira define-se:

Exatidão é o grau de conformidade de uma medida a um valor padrão ou verdadeiro. Isto deve ser comparado a outros termos que podem ser usados ao descrever a operação de um sistema a ser analisado.

Já a precisão significa o grau de refinamento com que uma operação é executada ou uma medida é indicada.

Dois tipos de precisão podem ser descritos: repetibilidade e reproduzibilidade.

Repetibilidade refere-se à capacidade do instrumento de duplicar sua medida, dada uma série definida das constantes. A reproduzibilidade refere-se à capacidade de duplicar valores de uma medida entre instrumentos diferentes ou usar os operadores diferentes, supondo que os mesmos procedimentos são seguidos.

Uma das formas mais simples e mais utilizadas para se obter a precisão de um equipamento ou medida é através do cálculo do desvio padrão, aonde se assume a incerteza da medida como sendo o próprio valor do desvio padrão. A média, o desvio padrão e o coeficiente de variação (desvio padrão/média x 100) são calculados então para o universo de valores que se apresenta. Tal técnica será utilizada neste trabalho para definir o grau de precisão das medidas e equipamentos.

5.3.2 – Incertezas das medições com os diferentes equipamentos

O medidor ultra-som utilizado para os ensaios apresenta, segundo o fabricante, o desvio de precisão de $\pm 1\%$ com a configuração e transdutores adotados.

Segundo Sanderson e Yeung (2002), a incerteza de uma medição ultra-sônica pode variar de $\pm 1\%$ a $\pm 5\%$ da leitura, dependendo da experiência do operador, condições da tubulação e do escoamento. Com estes fatores em boas condições, pode-se obter incertezas de $\pm 0,5\%$ a $\pm 2\%$ da leitura.

As recomendações de Sanderson e Yeung (2002) foram utilizadas para as campanhas de aferição ultra-sônicas, entre elas:

- Configuração de reflexão única para os transdutores (2 travessas ou em V).
- Localização do ponto de sinal máximo na montagem dos transdutores.
- Superfície da tubulação devidamente lixada ou limpa, no caso de PVC.
- Superfície dos transdutores paralelos ao eixo da tubulação.
- Montagem dos transdutores nas laterais do tubo, para se evitar bolhas de ar.
- Utilização de medidor de espessura para se determinar a espessura real das paredes dos tubos.
- Utilização de transdutor de 1 MHz, apropriado para tubulações com diâmetros de 50 a 2000mm

Os horímetros utilizados para os ensaios assim como os que estão instalados em campo, apresentam desvio de precisão da ordem de $\pm 0,005\%$, segundo o fabricante.

A Tabela 9 apresenta a incerteza das leituras dos horímetros em relação a um cronômetro tido como padrão. Neste caso são as incertezas relativas a cronômetro digital com leitura de 168 horas.

Tabela 9 – Incerteza nas leituras dos horímetros

Horímetro	Leitura Final (horas)	Incerteza (%)
1	167,99	0,006
2	168,01	-0,006
3	168,01	-0,006
4	168,00	0,000
5	168,01	-0,006
6	167,99	0,006
7	168,00	0,000
8	168,03	-0,018
9	168,00	0,000
10	168,02	-0,012

Desvio padrão de 1 a 10 = desvio de precisão = $\pm 0,0075\%$,

De acordo com o apresentado pode ser constatado que o desvio de precisão obtido nos testes não confere com a precisão indicada pelo fabricante, de $\pm 0,005\%$.

5.3.3 – Análise da Incerteza do Conjunto Ultra-Som/Horímetro em Campo

Para o cálculo da precisão do conjunto composto por horímetro/ultra-som, foi utilizada a mesma metodologia de Allen. Desta forma os valores obtidos para o conjunto de dados levantados em campo pode ser vista na Tabela 10. Nesta tabela encontram-se os valores característicos.

Tabela 10 – Análise dos resultados de todas as aferições

Média	-6,138
Maior valor	54,63
Menor valor	-72,43
Amplitude	127,06
Desvio padrão	21,59511

Já na Tabela 11 encontram-se os resultados considerando apenas os sistemas com filtro a jusante do ponto de medição (no caso dos sistemas para micro-aspersão ou gotejamento):

Tabela 11 - Análise dos resultados para sistemas com filtro

Média	-8,996
Maior valor	54,63
Menor valor	-72,43
Amplitude	127,06
Desvio padrão	30,01298

Levando-se em conta apenas as bombas para pivôs de irrigação, tem-se os resultados apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Análise dos resultados para sistemas sem filtro

Média	-2,945
Maior valor	2,55
Menor valor	-11,46
Amplitude	14,01245
Desvio padrão	3,763747

Com os resultados apresentados nas Tabelas 10, 11 e 12 pode-se calcular o desvio de precisão do conjunto através da fórmula (26):

$$E = \sqrt{(em^2) + (eh^2) + (et^2)} \quad (26)$$

Aonde:

E = Incerteza total

em = Incerteza do medidor ultra-som

eh = Incerteza do horímetro

et = Incerteza relativa à variação entre as vazões obtidas nas duas campanhas

Assim, foi calculado para o conjunto total de dados e apresentado na equação (27):

$$E = \sqrt{(1^2) + (0,0075^2) + (21,59511^2)} = \pm \mathbf{21,62\%} \quad (27)$$

Para os sistemas de Bombas com filtro obteve-se o resultado apresentado na equação (28):

$$E = \sqrt{(1^2) + (0,0075^2) + (30,01298^2)} = \pm \mathbf{30,03\%} \quad (28)$$

Para os sistemas de Bombas sem filtro, o resultado está indicado na equação (29):

$$E = \sqrt{(1^2) + (0,0075^2) + (3,7637^2)} = \pm \mathbf{3,89\%} \quad (29)$$

Mesmo com um conjunto de dados relativamente reduzido, pode-se considerar de grande valia os resultados obtidos em campo e em laboratório. Em se tratando de sistemas sem filtros na linha de adução, os resultados são ainda melhores, com um desvio de precisão global da ordem de $\pm 3,9\%$.

Cabe ressaltar que um fator externo pode diminuir a confiabilidade do sistema, que são as tentativas de fraude. Para garantir a inviolabilidade dos horímetros foram aplicados lacres às caixas de alojamento dos mesmos, de forma que não se tenha acesso à ligação de cabos da bomba. As figuras 29 e 30 ilustram tais caixas.

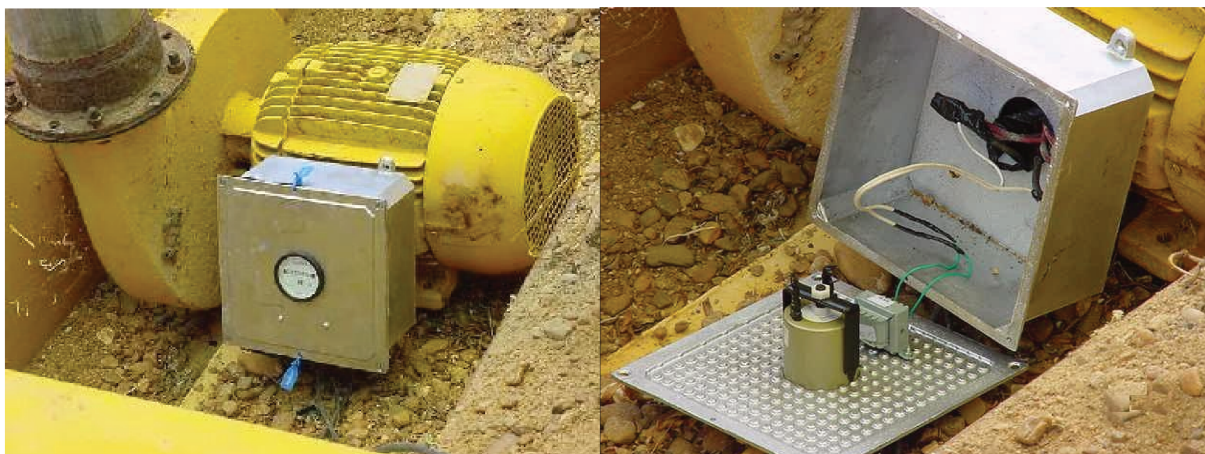


Figura 29 - Instalação padrão em caixa de alumínio ligado diretamente ao cabeamento de energização da bomba



Figura 30 - Lacres para garantir a inviolabilidade do sistema

5.3.4 – Incerteza do Conjunto Ultra-Som/Horímetro em Laboratório

Com a metodologia adotada para o conjunto em campo, procedeu-se o cálculo do desvio de precisão do conjunto horímetro/ultra-som que é expresso na equação (30):

$$E = \sqrt{(em^2) + (eh^2) + (ex^2)} \quad (30)$$

Em que:

E_1 = Incerteza total com ultra-som

E_2 = Incerteza total com turbina de inserção

em = Incerteza do medidor ultra-som

eh = Incerteza do horímetro

ex_1 = Incerteza relativa à variação de vazões do medidor ultra-som

ex_2 = Incerteza relativa à variação de vazões do medidor turbina de inserção

Assim, foi calculada a incerteza com a utilização do medidor ultra-som, equação (31) e com o medidor tipo turbina de inserção, equação (32) :

$$E_1 = \sqrt{(1^2) + (0,0075^2) + (0,009^2)} = \pm 1,000 \% \quad (31)$$

$$E_2 = \sqrt{(1^2) + (0,0075^2) + (0,033^2)} = \pm 1,001 \% \quad (32)$$

Em relação ao laboratório, as incertezas foram mínimas, principalmente pelo fato de que as distorções em relação a manobras no sistema e desgaste natural das bombas praticamente não existem. Isto contribuiu para se obter um desvio de precisão da ordem de $\pm 1,000\%$ relativo ao medidor ultra-som e $\pm 1,001\%$ relativo ao medidor tipo turbina de inserção.

Segundo Hershy (2002), as novas recomendações internacionais que envolvem o cálculo de incertezas indicam que a confiabilidade dos instrumentos para gerenciamento de recursos hídricos em geral não deve ser inferior a 95%, ou seja, desvio de precisão de no máximo $\pm 5\%$. Dessa forma, enquadram-se os dados de campo com sistemas sem filtro e os dados de laboratório.

5.4 – Análise Econômica e de Custos do Conjunto Horímetro/Ultra-Som em Relação a Outras Opções

Para poder justificar o uso desta opção de medição de vazão com o conjunto horímetro/ultra-som foi feita uma análise comparativa de custos. Desta forma foi selecionado um diâmetro nominal de 200mm, a partir do qual se levantaram os custos em relação a diversos tipos de medidores, que estão especificados na Tabela 13. Já na Tabela 14 estão indicados os custos para um diâmetro nominal de 400 mm.

Tabela 13 – Custos médios dos equipamentos DN 200 (em US\$)

Ultra-Som	13.000
Pitot Eletrônico	4.200
Eletromagnético	2.900
Pressão Diferencial com transdutores de pressão	2.100
Turbina de Inserção	1.900
Woltman com filtro*	1.600
Horímetro / Aferição ultra-sônica	150

* acessório necessário para utilização em água bruta

Tabela 14 – Custos médios dos equipamentos DN 400 (em US\$)

Ultra-Som	13.000
Pitot Eletrônico	4.200
Eletromagnético	3600
Pressão Diferencial com transdutores de pressão	2.100
Turbina de Inserção	2.000
Horímetro / Aferição ultra-sônica	150

Nota-se claramente a vantagem da solução horímetro/aferição ultra-sônica em relação aos principais medidores utilizados para mensurar água bruta, uma vez que este tem seu custo em torno de US\$150 para qualquer diâmetro e o mais próximo, medidor Woltman, tem seu custo em torno de US\$1600, ou seja, mais de dez vezes mais. Por outro lado, a diferença maior em relação ao custo do medidor eletromagnético se deve à eletrônica e tecnologia empregada.

* Cotação do dólar em 19/11/2003: US\$1 = R\$2,94

5.5 – Aplicação dos Sistemas de Medição por Horímetros à Resolução Nacional para Sistemas de Medição de Vazão para Usuários de Recursos Hídricos

No Anexo A é apresentada a minuta da resolução e suas bases legais. Esta resolução deverá ser assinada em 2003 ou 2004 pelo presidente da ANA, para assim entrar em vigor. Após diversas discussões a nível nacional entre órgãos regionais e consultores, percebeu-se a real necessidade de se apresentar ao mercado novas opções (preferencialmente econômicas) para o monitoramento de volumes captados por irrigantes, indústrias e companhias de saneamento.

Na Tabela 15 se indica o desvio de precisão máxima requerido pela minuta da resolução.

Tabela 15 – Desvios de precisão máximos admissíveis para os sistemas de medição de acordo com os usos e faixas de vazão, segundo a minuta da resolução ANA (2003)

Usos	Desvio de precisão máximo (%)		
	Faixa I	Faixa II	Faixa III
Captação Industrial	± 5	± 3	± 2
Lançamento Industrial	± 10	± 7,5	± 5
Captação para consumo humano ou irrigação	± 10	± 7,5	± 5
Lançamento proveniente de consumo humano ou irrigação	± 15	± 10	± 7,5

A minuta visa com estes valores, exigir um pouco mais de precisão para as indústrias, em virtude de sua maior capacidade de pagamento, além de geralmente possuir uma tarifa mais elevada em relação às aplicadas para consumo humano ou irrigação.

Como se pode observar na exigência de precisão da minuta, a utilização de horímetros em sistemas de medição atende à maioria dos itens da resolução, tanto em relação à precisão, quanto à sua interface em relação a sistemas telemétricos, bastando para isso a instalação de horímetros digitais, com saída de pulsos ou 4 a 20 mA.

Levando-se em conta a resolução da ANA, a utilização do conjunto ultrassom/horímetro em sistemas sem filtros se adequaria a todos os usos, a não ser às faixas 2 e 3, referentes à captação industrial, que exigem desvio de precisão de ± 3 e $\pm 2\%$, respectivamente (Anexo A). O conjunto também poderia ser adotado ao lançamento industrial desde que este passasse por recalque em algum momento. Quanto à captação para consumo humano ou irrigação não existem restrições. A utilização de horímetros, portanto, se mostra como uma solução viável tecnicamente e economicamente, visto seu baixo custo de implantação e precisão proporcionada.

6 – Conclusões

Um fator que leva à utilização de soluções econômicas para se mensurar a água captada, principalmente em se tratando de irrigação, é o fato de que existe uma tendência natural (como já ocorre no Ceará, por exemplo) de que o valor da água para este fim seja mais baixo. Isso impediria em muitos casos a própria mensuração da água, visto que o medidor convencional pode assumir valores mais elevados do que as tarifas aplicadas a longo prazo, ou seja, em determinadas situações o medidor só se pagaria após muito tempo, o que não viabiliza sua aquisição. A solução aqui apresentada é de baixíssimo custo, quando comparada às outras técnicas e equipamentos utilizados atualmente.

Mesmo com a precisão prejudicada nos sistemas dotados de filtros, a possibilidade de utilização do conjunto ultra-som/horímetro é viável, desde que se dê atenção especial à limpeza dos mesmos, com planos de manutenção periódicos e regulares. Tal medida também auxiliaria a economia de energia elétrica. Pode-se considerar de grande valia os resultados obtidos em campo e em laboratório, e em se tratando de sistemas sem filtros na linha de adução, os resultados indicaram um desvio de precisão global da ordem de $\pm 3,9\%$. A utilização do conjunto ultra-som/horímetro em sistemas sem filtros se adequaria a todos os usos, a não ser nas faixas referentes à captação industrial, que exigem desvio de precisão de ± 3 e $\pm 2\%$, respectivamente, de acordo com a legislação em estudo. O conjunto também poderia ser adotado ao lançamento industrial desde que este passasse por recalque em algum momento. Quanto à captação para consumo humano ou irrigação não existem restrições. A utilização de horímetros, portanto, se mostra como uma solução viável tecnicamente e economicamente, visto seu baixo custo de implantação e precisão proporcionada. Desta forma, conclui-se que a proposta de utilização de medidor ultra-som associado com horímetro é apropriada.

É importante citar a importância de se realizar aferições periódicas regulares, visto que fatores como desgaste do rotor, pequenas alterações na linha de adução, instalação de válvulas ou outros equipamentos que possam ocasionar a elevação da perda de carga (tanto localizada quanto distribuída), variação do nível da fonte de captação, etc. podem distorcer drasticamente os resultados obtidos.

Algumas ações podem também ser realizadas para se otimizar a solução, como por exemplo a utilização de caixas lacradas instaladas diretamente no corpo das bombas, onde se alojariam os horímetros. Tal medida evitaria qualquer tentativa de fraude, assim como auxiliaria a manter a segurança do sistema, desinibindo pessoas não autorizadas a romper o lacre.

A diferença de precisão indicada pela fábrica de horímetros pode ser causa de um lote que tenha sido fabricado sem o devido controle de qualidade. Outro lote poderia ser testado no futuro.

Este estudo foi limitado a uma determinada área de abrangência devido às instalações disponíveis, ao tempo exigido para a aferição, à proximidade das instalações e ao deslocamento da equipe de trabalho para efetuar as medições. Novos estudos seguindo a metodologia aqui apresentada deveriam ser realizados para validar o procedimento.

Sugere-se que o estudo aqui apresentado seja utilizado como uma alternativa geral, prática, econômica e com um grau de precisão satisfatório para ser utilizada na mensuração de água bruta para todos os usos, exceto nas faixas referentes à captação industrial.

Como outras sugestões para futuros estudos está a possibilidade de testar a combinação horímetro/ultra-som com equipamentos de outros fabricantes, assim como, se possível, ampliar o universo de dados coletados e analisados. As condições locais podem não representar todas as possibilidades e particularidades de cada situação e quanto mais estudos forem realizados a respeito, maior será a confiabilidade nos resultados obtidos.

O estudo aqui apresentado pode ser utilizado como uma alternativa geral, de abrangência científica e a nível internacional, visto que a gestão dos recursos hídricos, principalmente em sua forma bruta, é tida como uma demanda mundial, onde tais recursos são a cada momento mais escassos. Também sugere-se fazer estudos utilizando outras variáveis como por exemplo considerando a pressão disponível na bomba.

Referências Bibliográficas

Actaris; Water Division; Disponível: <http://www.actaris.com/water/intro.shtml>; Acesso: 06/02/2003.

Agência Nacional de Águas – ANA; Títulos Diversos. Disponível: <http://www.ana.gov.br/>. Acesso: 04/02/2003.

ARAD Ltd.; Water Measuring Technologies; Disponível: <http://www.arad.co.il>; Acesso: 07/02/2003.

Allen, Terence; Particle Size Measurement; John Wiley and Sons; New York; 1975.

Asea Brown Boveri Brasil; Serviços e Produtos / Instrumentação; Disponível: <http://www.abb.com.br>. Acesso: 04/02/2003.

Belock, Daryl; McDonald, Phil; Water System Standardizes on Clamp-On Ultrasonic Flowmeters; WaterWorld; maio de 2002.

Brand, F.L; Akustische Verfahren zur Durchflußmessung, messen prüfen automatisieren ; 1987.

Comitê para Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul – CEIVAP; Disponível: <http://www.ceivap.org.br>; Acesso em 03/02/2003.

Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Estado do Ceará – COGERH; Disponível: <http://www.cogerh.com.br>; Acesso em 27/01/2003.

Conaut Controles Automáticos / medidores eletromagnéticos; Disponível: <http://www.conaut.com.br>; Acesso em 12/10/2002.

Delmée, Gerard J. ; Manual de Medição de Vazão; Blücher; São Paulo; 1983.

GE Panametrics inc. / Ultrasonic Transit Time Liquid Flowmeters; Disponível: http://www.panametrics.com/div_pci/pages/products/flowmeters/index.shtml. Acesso: 06/02/2003.

Hersch, R. W.; The Uncertainty in a Current Meter Measurement; CNS Scientific and Engineering Services; Reading, RG4 7JA; Inglaterra; novembro de 2002.

Kohno, M.; Nakagawa, Y.; Yamamoto, T.; Irmano Y.; A Fully Intelligent Ultrasonic Flowmeter; IECON , Vol. 2; 1984

Lemos, H. M.; Instituto Brasil Pnuma; Autos do Comitê Brasileiro do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente; 2003.

Lemos, Yvone. F.; Válvula para Dissipação de Energia e Controle; Aplicação em Instalações Hidráulicas; Universidade de São Paulo; USP, São Paulo; 1986.

Lynnworth, L.C.; “Ultrasonic Measurements for Process Control; Theory, Techniques, Applications”, Academic Press, Inc. Harcourt Brace Jovanovich; Publishers; Boston, San Diego, New York etc.; 1989.

Marques, J. A. F. e Teles, L.A.S.; Experiência da Embasa com Medidor Proporcional de Vazão; EMBASA (Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A.); Salvador; 1982.

Magori, V.; A novel ultrasonic flow sensor based on lambda locked loop principle with interdigital transducers; Ultrasonic Symposium IEEE; 1985.

Minuta de Resolução para instalação, operação e manutenção de sistemas de medição de vazão na captação de água bruta e no lançamento de efluentes em corpos d’água de domínio da União; Agência Nacional de Águas; Brasília; 2002.

Newsletter of The Twin Platte Natural Resources District; Vol. 10; 2000. Disponível: <http://linux1.nrc.state.ne.us/tpnrd>; Acesso: 20/09/2002.

Paul Davis Automation; Redington Counters / Hourmeters; Disponível: <http://www.pauldavisautomation.com/redington.html>; Acesso: 23/01/2003.

Pinto, L. C. B.; A Utilização de Válvulas Dispersoras Cônicas como Dispositivo de Medição de Vazão; Universidade Estadual de Campinas – Unicamp; Campinas; 1997

Redington Counters; Electronic Hour Meters; Disponível: <http://www.redingtoncounters.com>; Acesso: 24/01/2003.

Sanderson, M. L., Yeung, H.; Guidelines for the use of ultrasonic non-invasive metering techniques; Department of Process and Systems Engineering, School of Engineering; Cranfield University; Cranfield, Bedford; Inglaterra; 2002.

Solazzo, Tony; Accuracy and Precision; Hockmeyer Equipments Corp.; Disponível: <http://services.juniata.edu/ScienceInMotion/chem/labs/phprop>; Acesso: 03/09/2003.

Turotest Medidores.; Horímetros Linha Industrial; Disponível: <http://www.turotest.com.br>; Acesso: 12/01/2003.

Watthourmeters; Disponível: <http://www.watthourmeters.com/fortwayne/duncan-lamp.html>; Acesso: 10/01/2003.

Bibliografia

Clayton, D. Control Engineering; Disponível: <http://www.manufacturing.net/ctl/index.asp>; Acesso: 04/04/2003

Lam, F.K.; Hui, M.S.; “ An Ultrasonic Pulse Compression System for Non-Destructive Testing Using Maximal Length sequences”; Maio de 1982.

FW Murphy; Industrial Products; Disponível: <http://www.fwmurphy.com>; Acesso: 18/01/2003.

LAO Indústria (Liceu de Artes e Ofícios); Sistemas de Medição; Disponível: <http://www.laosp.com.br/htmls/index.htm>; Acesso: 05/02/2003.

Maxima Technologies / Datcon; Sentinel and Heavy Duty Hourmeters; Disponível: <http://www.datcon.com/prelease/prunivclust.htm>; Acesso: 24/01/2003.

Mod-Tronic Instruments Limited; LCD Hourmeter; Disponível: <http://www.process-controls.com/Modtronics>; Acesso: 25/01/2003.

NDT Resource Center; Introduction to Ultrasonic Testing; Disponível: http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/cc_ut_index.htm; Acesso: 07/02/2003

Stockman, John D.; Fochtman, Edward G.; Particle Size Analysis; Ann Arbor Science Publishers; Ann Arbor - Michigan; 1979.

Streeter, Victor Lyle; Mecânica dos Fluidos; McGraw-Hill do Brasil; São Paulo; 1977.

Water on Line Homepage; Search for ultrasonic flowmeters; Disponível: <http://www.wateronline.com/IndustrySearch/SearchResults.aspx>; Acesso em 24/10/2002.

ANEXOS

Anexo A – Minuta da Resolução da ANA

RESOLUÇÃO Nº, DE DE DE 2003

O DIRETOR-PRESIDENTE DA AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA, no uso da atribuição que lhe confere o inciso XVII do art. 16 do Regimento Interno, aprovado pela Resolução nº 9, de 17 de abril de 2001, torna público que a **DIRETORIA COLEGIADA**, em sua Reunião Ordinária, realizada em de de, com fundamento nos incisos I, II, V, XII e XIV do art. 4 da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000 e:

CONSIDERANDO a necessidade de estabelecer critérios para instalação, operação e manutenção de sistemas de medição de vazão na captação de água bruta e no lançamento de efluentes em corpos d'água de domínio da União;

Considerando a maior confiabilidade para o usuário dos dados medidos de captação e lançamentos de efluentes, passíveis de fiscalização, cobrança e de monitoramento previstos na Lei 9433, de 8 de janeiro de 1997;

Considerando os dispositivos do Art. 4º inciso II da Lei 9984;

RESOLVE:

Art. 1º. Aprovar diretrizes para instalação, operação e manutenção de sistemas de medição de vazões e volumes, captados ou lançados, em corpos d'água de domínio da União, a serem observados pelos usuários de recursos hídricos.

Art. 2º. Para efeito desta Resolução, considera-se:

I - **usuário:** pessoa física ou jurídica que utiliza água bruta;

II - **sistema de medição de vazão:** conjunto formado pelas instalações físicas, equipamentos, acessórios e instrumentos de medição e registro de dados que permite o monitoramento das vazões e volumes nos níveis de precisão adequados;

III - **instrumento de medição de vazão:** dispositivo mecânico, hidráulico, eletromagnético, acústico, de reflexão espectral ou de concepção tecnológica mista, baseado em princípios físicos de medição de pressão, velocidade do fluido, altura de seção, volume ou outra grandeza que permita o registro de volumes de fluidos por unidade de tempo;

IV - **captação:** retirada de água de um corpo hídrico;

V - **captação emergencial:** retirada de água de um corpo hídrico, para atendimento extemporâneo de necessidades emergenciais;

VI - **lançamento:** toda emissão direta, indireta ou difusa de efluentes líquidos, resultante do uso em qualquer empreendimento ou atividade, em um corpo d'água.

Art. 3º. Para efeito desta Resolução, são finalidades de uso de recursos hídricos:

I – **industrial:** como matéria prima de produção ou insumo para o processo produtivo ou que seja utilizado para destino final de seus resíduos;

II – **aqüicultura:** para a criação de peixes e espécies aquáticas, utilizando tanques, viveiros ou açudes;

III - **criação de animais para fins comerciais:** como insumo em projetos de criação intensiva ou extensiva de animais, com finalidade comercial ou para destinação de seus resíduos;

IV - **geração de energia elétrica**: para geração de energia elétrica pelo aproveitamento do potencial hidráulico em hidroelétricas, bem como em termelétricas e usinas nucleares;

V - **irrigação**: para o atendimento a demandas de irrigação;

VI - **mineração**: no processo de extração mineral, desde que atendidos os dispositivos do Código de Mineração;

VII - **recreação, turismo e paisagismo**: para atividades de recreação e turismo, tais como: pesca, natação, esqui aquático e mergulho e, ainda, para composição paisagística do ambiente; e,

VIII - **saneamento básico**: em sistemas de abastecimento de água, de esgotamento sanitário, de drenagem urbana e de resíduos sólido, bem como o atendimento das necessidades de higiene e saúde pública para núcleos populacionais, usos em empreendimentos comerciais, industriais e de prestação de serviços.

Art. 4º. O usuário deverá instalar, operar e manter os sistemas de medição de vazão, registrando os dados observados e medidos, na forma prevista no ato de outorga de direito de uso e nas diretrizes estabelecidas por esta Resolução.

§1º - O registro dos dados observados e medidos pelo usuário devem permanecer à disposição da fiscalização da ANA, por um período de cinco anos.

§2º - O usuário responderá pela conformidade da instalação, manutenção, aferição e calibração periódica do sistema de medição, inclusive quanto à sua inviolabilidade.

§3º - Os projetos das instalações dos sistemas de medição devem ser compatíveis com os sistemas normalizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, e acompanhar o pedido de outorga de direito de uso, com a assinatura do responsável técnico devidamente habilitado pelo Conselho Regional de Engenharia e Arquitetura - CREA.

§4º - A aferição e calibração do sistema de medição deve ser efetuada, seguindo as especificações do fabricante e do INMETRO.

§5º O usuário deverá permitir livre acesso aos sistemas de medição, captação e lançamento, a qualquer ação de fiscalização e eventual aferição do sistema, pelos fiscais da ANA ou por qualquer representante credenciado por esta.

Art. 5º. O usuário deverá apresentar à ANA boletim anual, em data a ser definida no ato da outorga, com às medições mensais, bem como as do ano anterior, de acordo com formulários próprios a serem disponibilizados pela ANA.

Art. 6º. As captações emergenciais devem ser justificadas junto à ANA.

Art. 7º. Para efeito desta Resolução, serão consideradas as seguintes faixa de vazões:

Faixa	Vazões m³/h (L/s)
I	> insignificante a 70 (19,4);
II	> 70 (19,4) a 300 (83,3);
III:	>300 (83,3).

Art. 8º. Os sistemas de medição de vazão devem apresentar níveis de precisão compatíveis com os usos e respectivas faixas fixadas no ANEXO I;

§ Único – Nos casos em que o usuário tiver mais de uma captação ou lançamento, o nível de precisão a ser adotado em suas medições, será o da faixa correspondente ao somatório das diversas captações ou lançamentos, de acordo com os volumes a ele outorgados.

Art. 9º. Os usos que não se enquadram no ANEXO I, serão avaliados pela ANA.

Art. 10º. Os sistemas de medição devem ser dotados de selos, lacres ou dispositivos que garantam sua inviolabilidade.

Art. 11º. Todos os sistemas de medição devem dispor de algum tipo de registrador, seja mecânico, eletrônico ou gráfico.

§ 1 - Para os usuários das faixas I e II, os sistemas de medição devem dispor, no mínimo, de registro do tipo totalizador, que registra, de hora em hora, de forma cumulativa, apenas o total volumétrico medido.

§ 2- Para os usuários da faixa III, os sistemas de medição devem possuir, além dos equipamentos exigidos para os das faixas I e II, dispositivos de telemetrização, que possibilitem o envio de sinal, analógico ou digital, em tempo real, para monitoramento remoto, disponibilizando informações de, no mínimo, três vezes ao dia.

§ 3 – A ANA, a seu critério, coletará esses dados de acordo com o plano de acompanhamento e supervisão dos usuários.

Art. 12º. A não observação dessa Resolução sujeitará o usuário às penalidades estabelecidas na Resolução No. 82, de 24 de abril de 2002, que dispõe sobre os Procedimentos e define as atividades de Fiscalização da ANA.

Art. 13º. Os usuários já outorgados pela ANA terão um prazo de 180 (cento e oitenta) dias para se adequarem às normas estabelecidas por esta resolução.

Art. 14º. Esta Resolução entra em vigor na data de sua publicação.

Tabela A.1 – Desvios de precisão máximos admissíveis para os sistemas de medição de acordo com os usos e faixas de vazão.

Usos	Desvio de precisão máximo (%)		
	Faixa I	Faixa II	Faixa III
Captação Industrial	± 5	± 3	± 2
Lançamento Industrial	± 10	± 7,5	± 5
Captação para consumo humano ou irrigação	± 10	± 7,5	± 5
Lançamento proveniente de consumo humano ou irrigação	± 15	± 10	± 7,5

Abstract

Pinto, Luiz Celso Braga. Alternative **Procedure for Indirect Volumetric Totalization of Crude Water**. Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 104 pages. Thesis.

The necessity of crude water and sewer flow discharge measuring is an actual preoccupation because the market is not yet properly adapted for this function. In Brazil most of flow meters and measuring techniques used are specified to be used with fresh water, instead of crude water withdrawals. The objective of this thesis is the supplying of a crude water measuring option with low costs and great accuracy. Studies in laboratory and field were done to test the solution employing hour-counter in pumps, associated with an ultra-sound flow meter gauged through the pumped pipes. The results, in systems without filters in line, showed an accuracy of $\pm 3,9\%$. It proves that the hour-counter solution has viability in costs and technically, because it has a low-costing implementation as well as satisfactory accuracy.

Key word: discharge; volume; ultra-sound; hour-counter; indirect measuring.