

TESE
1096

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

*Estudo da adequação do uso do método acústico
Doppler para medição de vazão a pequenos
e médios cursos d'água*

GEYSA TIBURCIO CAETANO

ITAJUBÁ - MG

2000

GEYSA TIBURCIO CAETANO



**ESTUDO DA ADEQUAÇÃO DO USO DO MÉTODO
ACÚSTICO DOPPLER PARA MEDAÇÃO DE
VAZÃO A PEQUENOS E MÉDIOS CURSOS
D'ÁGUA**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA À ESCOLA
FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DA
ENERGIA

ITAJUBÁ, 2000

GEYSA TIBURCIO CAETANO

**ESTUDO DA ADEQUAÇÃO DO USO DO MÉTODO
ACÚSTICO DOPPLER PARA MEDIÇÃO DE
VAZÃO A PEQUENOS E MÉDIOS CURSOS
D'ÁGUA**

**DISSERTAÇÃO APRESENTADA À ESCOLA
FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DA
ENERGIA**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
GERAÇÃO HIDRELÉTRICA**

**ORIENTADOR:
PROF. DR. GERALDO LÚCIO TIAGO FILHO**

ITAJUBÁ, 2000

Caetano, Geysa Tiburcio

Estudo da Adequação do Uso do Método Acústico Doppler
para Medição de Vazão a Pequenos e Médios Cursos D'água.
Itajubá, 2000.

Dissertação (Mestrado) - Escola Federal de Engenharia de Itajubá. 1 –
Medição de vazão. 2 – Métodos convencionais. 3 – Método acústico
Doppler. I – Escola Federal de Engenharia de Itajubá. Engenharia da
Energia.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não teria sido possível sem a ajuda de pessoas que sempre estiveram ao meu lado, apoiando-me. Dentre elas, quero agradecer a todos que contribuíram para a realização desta pesquisa.

Quero agradecer ao Professor Presidente e Mestre Dr. José Geraldo da Silva, pelo incentivo e apoio ao desenvolvimento da minha pesquisa e aposse agradeço ao Prof. Dr. José Geraldo da Silva, pelo incentivo e apoio ao desenvolvimento da minha pesquisa.

Ao Enrico, que, com seu amor e compreensão, me deu o incentivo necessário à realização deste trabalho.

Aos meus pais, que me ensinaram coisas importantes como perseverança, honestidade e responsabilidade, me apoiando sempre com carinho em todos os momentos.

Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

A realização de um trabalho experimental como este, só é possível com o apoio e a ajuda de colaboradores. Diante disso, quero agradecer a todos que, de alguma forma, me ajudaram nesta conquista.

Ao Professor, orientador e amigo Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho, pelos ensinamentos de hidrometria e áreas afins, pelo apoio, incentivo, orientação e amizade, demonstrados desde o meu primeiro dia na EFEI.

Aos demais professores do LHPCH, em especial ao Dr. Augusto Nelson Carvalho Viana, pela amizade e apoio na realização deste trabalho.

Aos Professores Dr. Afonso Henriques Moreira Santos e Dr. Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas, que tornaram possível a realização deste trabalho, pela disponibilização do instrumento ADCP e pelas oportunidades de participação no Projeto HiBAm.

A todos do Projeto HiBAm, pelo carinho e por tudo que me ensinaram durante as campanhas, em especial, ao Dr. Eurides de Oliveira, ao Dr. Valdemar Guimarães e ao Engº Mauro Sílvio Rodrigues.

Ao Engº Herbert Parentes Fortes Filho, por todo o material técnico enviado sobre o ADCP.

Aos colegas, amigos e funcionários do LHPCH, por toda a amizade e ajuda que me deram durante a realização do trabalho.

Aos amigos e funcionários do CERPCH e da PCH Luiz Dias, pela colaboração neste trabalho, em especial ao Engº Ângelo Stano Júnior, pelo apoio durante o trabalho realizado na Luiz Dias.

Aos alunos do curso de Engenharia Hídrica que participaram deste trabalho, ajudando nas medições de vazão e confecção de figuras ilustrativas.

Agradecimentos especiais ao Prof. Benedito Cláudio da Silva, pelo apoio durante a parte experimental e auxílio na revisão do trabalho, ao aluno de Engenharia Hídrica, Carlos Cesar Malta de Oliveira, pelo auxílio na análise estatística dos dados, ao funcionário Osvaldo de Melo Rodrigues, que, com sua determinação e praticidade, muito colaborou nos testes e medições realizados, e à secretária e amiga Maria Amélia Corrêa Furtado Pereira, que, com carinho e eficiência, sempre me ajudou.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	ii
LISTA DE ABREVIATURAS	iii
SIMBOLOGIA	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 Objetivo do Trabalho	02
1.2 Justificativa	02
1.3 Plano de Trabalho	04
1.4 Conteúdo do Trabalho de Dissertação	05

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	06
--	----

CAPÍTULO 3 – EQUIPAMENTOS E MÉTODOS TRADICIONAIS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO

3.1 Histórico	12
3.2 Conceitos Básicos	
3.2.1 Hidrometria	13
3.2.2 Escoamento em Canais Abertos	13
3.2.2.1 Tipos e Regimes de Escoamentos	13
3.2.3 Vazão ou descarga líquida	14
3.2.4 Estação Fluviométrica	15
3.2.5 Seção de Medição	16
3.2.6 Batimetria	17
3.2.7 Curva-chave	18
3.3 Equipamentos e métodos tradicionais utilizados na medição da vazão	
3.3.1 O Vertedor	20
3.3.1.1 Vertedor de Soleira Delgada	21
3.3.1.2 Vertedor de Soleira Espessa	21

3.3.1.3 Vertedor de Soleira Curta	21
3.3.1.4 Vertedores Especiais (para Barragens)	22
3.3.2 A Calha	23
3.3.2.1 Calha Parshall	23
3.3.3 O Molinete Hidrométrico	24
3.3.3.1 Medida de velocidade	25
3.3.3.2 Medida de área	26
3.3.4 A Transonda	27
3.3.5 O Método da Declividade	28
3.3.6 O Flutuador	29
3.3.7 As Sondas Estáticas	29
3.3.7.1 Sondas de Pitot e de Darcy	30
3.3.7.2 Sondas de Darcy-Cole e de Recknagel	31
3.3.7.3 Sonda Venturi	31
3.3.8 O Processo de Diluição	33

CAPÍTULO 4 – O ADCP

4.1 O que é o ADCP?	36
4.2 Histórico do advento do uso do ADCP	36
4.3 Conceitos Básicos	
4.3.1 Efeito Doppler	39
4.4 Princípio de funcionamento do ADCP	
4.4.1 Principais características do ADCP	43
4.4.2 O Sistema ADCP	49
4.4.3 Modos de operação do ADCP	51
4.4.4 Limitações operacionais	52
4.4.5 Algoritmo para processamento de vazão	53
4.4.6 Fórmulas e cálculos	55
4.4.6.1 Cálculo da vazão	55
4.4.7 Estimativa da vazão nas partes não medidas da seção transversal	56
4.4.7.1 Estimativa da vazão nas áreas não medidas do perfil de velocidades	56
4.4.7.2 Estimativa da vazão nas áreas próximas às margens	58

4.4.7.2.1 Equações para estimativas de vazão nas áreas próximas às margens	59
--	----

CAPÍTULO 5 – METODOLOGIA DE MEDIÇÃO DE VAZÃO UTILIZANDO ADCP

5.1 Procedimentos necessários à medição com ADCP

5.1.1 Procedimentos prévios de escritório	61
5.1.1.1 Revisões de programa e equipamento	61
5.1.1.2 Inspeção prévia	62
5.1.2 Procedimentos de campo	63
5.1.2.1 Instalação no barco	63
5.1.2.2 Averiguação do instrumento	64
5.1.2.3 Arranjo do arquivo de configuração	65
5.1.2.4 Medições de vazão	65
5.1.2.5 Verificação da qualidade dos dados	67
5.1.2.6 Avaliação da medição	67
5.1.3 Procedimentos pós-campo	68
5.1.3.1 Revisão da medição de vazão	68
5.1.3.2 Documentação e arquivamento das medições de vazão	69
5.2 Metodologia de medição de vazão com ADCP	69
5.2.1 Medições em grandes cursos d'água	69
5.2.2 Medições em pequenos e médios cursos d'água	70
5.2.3 Dispositivo para fixação do ADCP	72

CAPÍTULO 6 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 Introdução	75
6.2 Teste realizado no canal de vidro do LHDC	75
6.3 Medições realizadas no canal de adução da PCH Luiz Dias	77
6.4 Medições realizadas na estação fluviométrica selecionada	78
6.4.1 Correlação entre as medições realizadas com o ADCP e a curva-chave	82
6.4.1.1 Diagrama de dispersão	82
6.4.2 Teste de hipóteses para correlação linear	84

6.4.2.1 Componentes de um teste formal de hipótese	84
6.4.2.1.1 Hipótese nula	84
6.4.2.1.2 Hipótese alternativa	84
6.4.2.1.3 Nível de significância	85
6.4.2.1.4 Coeficiente de correlação linear	85
6.4.2.1.5 Estatística de teste	85
6.4.3 Reta de regressão	86
6.4.4 Teste de hipóteses para média dos desvios	87
6.4.4.1 Hipótese nula	87
6.4.4.2 Hipótese alternativa	87
6.4.4.3 Nível de significância	88
6.4.4.4 Estatística de teste	88
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
ANEXOS	
ANEXO I - Características do ADCP Workhorse Rio Grande - 1200 kHz	96
ANEXO II - Arquivos de Configuração do Programa Transect	98
ANEXO III - Modos de Operação do ADCP Workhorse Rio Grande -	
1200 kHz	99
ANEXO IV - Conjuntos de Dados de Medições da Estação Fluviométrica	
FECl, Descartados pelo Critério do Coeficiente de Variação -	
Intervalo de Confiança de 67%	100
ANEXO V - Incerteza na Medição	102
ANEXO VI - Distribuição t de Student	124

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 - Comparação entre medições realizadas com ADCP e com um medidor ultra-sônico	07
--	----

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 - Esquema do método área-velocidade para cálculo da vazão	15
Figura 3.2 - Seção de réguas da estação fluviométrica PCH Luiz Dias	16
Figura 3.3 - Medição de vazão a vau com barco na estação fluviométrica Luiz Dias, localizada na PCH Luiz Dias, Rio Lourenço Velho, Itajubá - MG	16
Figura 3.4 - (a) Haste com molinete hidrométrico (medição a vau); (b) Barco com guincho hidrométrico; (c) Seção de medição com cabo aéreo	17
Figura 3.5 - Esquema para realização da batimetria	18
Figura 3.6 - Curvas-chave univocas	19
Figura 3.7 - Curvas-chave não-univocas com seção ou controle instável	19
Figura 3.8 - Formatos de soleira	21
Figura 3.9 - Vertedores de Creager e de Scimeni	22
Figura 3.10 - Calha Parshall	23
Figura 3.11 - Molinete de eixo horizontal	24
Figura 3.12 - Velocidades próximas à superfície e ao fundo do canal	25
Figura 3.13 - Processo gráfico para cálculo da vazão medida com molinete	27
Figura 3.14 - Corte esquemático longitudinal em uma transonda com transdutor diferencial	28

Figura 3.15 - Tubo de Pitot e tubo de Darcy	30
---	----

Figura 3.16 - Sondas duplas Darcy-Cole e Recknagel	31
Figura 3.17 - Esquema de microventuri com suas principais características	32
Figura 3.18 - Processo químico de diluição - Método por injeção	34
Figura 3.19 - Processo químico de diluição - Método por integração	35

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 - O ADCP – Perfilador Doppler-Acústico de Corrente - modelo Workhorse Rio Grande - 1200 kHz	36
--	----

Figura 4.2 - Foto de um mini ADP fixado em um pequeno catamaran com sistema de transmissão de dados via rádio/modem	38
Figura 4.3 - O Efeito Doppler: (a) o observador parado; (b) o observador em movimento na direção da fonte; (c) o observador em movimento na direção contrária da fonte	40
Figura 4.4 - Velocidade do som	41
Figura 4.5 - Atraso na propagação do som e mudança de fase causados pelo deslocamento da partícula	43
Figura 4.6 - Princípio de funcionamento	44
Figura 4.7 - Mudança na freqüência causada pelo efeito Doppler	45
Figura 4.8 - Geometria dos feixes sonoros do ADCP	46
Figura 4.9 - Componentes de velocidade da água	46
Figura 4.10 - Exemplo típico de uma medição com ADCP	47
Figura 4.11 - Eco retornado de duas partículas em suspensão	48
Figura 4.12 - Modulação versus tempo de plotagem para muitas partículas	48
Figura 4.13 - Componentes do sistema ADCP	50
Figura 4.14 - Área da seção de medição dividida em subseções	52
Figura 4.15 - Trajetória do barco durante a medição	56
Figura 4.16 - Estimativa da vazão pelo método constante	57
Figura 4.17 - Estimativa da vazão pelo método da curva de potência	58
Figura 4.18 - Esquema para estimativa de áreas próximas às margens, não medidas pelo ADCP	58
Figura 4.19 - Formas aproximadas das áreas próximas às margens, não alcançadas pelo adcp: (a) triangular; (b) retangular	60
CAPÍTULO 5	
Figura 5.1 - Janela principal do programa Transect	62
Figura 5.2 - Posição do sensor nº 3 e profundidade do transdutor	64
Figura 5.3 - Foto de um arranjo para medição com ADCP em pequenos cursos d'água, utilizado na estação fluviométrica FECI	72
Figura 5.4 - Foto de um arranjo com suporte fixo em barco de alumínio, utilizado no Senegal, África	73
Figura 5.5 - Foto de arranjo com suporte fixo em barco inflável, utilizado pela USGS	73

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1 - Regimes de escoamento, de acordo com o número de Froude 14

Tabela 3.2 - Espaçamento entre as verticais da seção de medição 27

CAPÍTULO 6

Tabela 6.1 - Resultados obtidos no canal de adução da PCH Luiz Dias 78

Tabela 6.2 - Parâmetros utilizados na configuração das medições com o
ADCP Workhorse Rio Grande - 1200 kHz 78

Tabela 6.3 - Resultados obtidos na estação fluviométrica FECI 81

Tabela 6.4 - Comparação das medições de vazão com ADCP e a curva-chave
da estação 81

ANEXOS

Tabela II.1 - Arquivos de Configuração - ADCP Workhorse Rio Grande
1200 kHz 98

Tabela III.1 - Modos de Operação - ADCP Workhorse Rio Grande - 1200 kHz 99

Tabela IV.1 - Dados coletados em 20/07/2000 - Cota: 100 cm 100

Tabela IV.2 - Dados coletados em 18/08/2000 - Cota inicial: 155 cm/
final: 146 cm 100

Tabela IV.3 - Dados coletados em 18/09/2000 - Cota: 95 cm 101

LISTA DE ABREVIATURAS

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler, ou Perfilador Doppler-Acústico de Corrente
ADP	Acoustic Doppler Profiler
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
COPEL	Companhia Paranaense de Energia Elétrica
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
EFEI	Escola Federal de Engenharia de Itajubá
FECI	Faculdade de Engenharia Civil de Itajubá
HiBAm	Projeto Hidrologia da Bacia Amazônica
LHDC	Laboratório Hidromecânico Didático Científico
LHPCH	Laboratório Hidromecânico para Pequenas Centrais Hidrelétricas
OMM	Organização Mundial de Meteorologia
ORSTOM	Instituto Francês para a Pesquisa e o Desenvolvimento em Cooperação
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
SIH	Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas
SUDERHSA	Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
USGS	United States Geological Survey

SIMBOLOGIA

SIMBOLOGIA LATINA

A	Área da seção transversal; área média, em (m^2)
A, B, C, n	Constantes próprias de uma estação fluviométrica
a, b	Constantes de calibração do molinete
B	Limite superior do erro sistemático
b	Largura do vertedor, em (m)
C	Velocidade do som, em (m/s); concentração de uma solução química
CV	Coeficiente de variação
D, d	Diâmetro, em (mm); tamanho da célula de profundidade
d_e	Profundidade na subseção estimada, em (m)
d_m	Profundidade na subseção medida, em (m)
d_{mi}	Distância do PI até a margem do canal, em (m)
d_{mf}	Distância do PF até a margem do canal, em (m)
d_t	Distância da travessia, em (m)
f	Freqüência, em (Hz)
F_d, fd	Freqüência do efeito Doppler, em (Hz)
F_r	Número de Froude
F_s	Freqüência do som quando tudo está parado, em (Hz)
F_t	Freqüência fixa, em (Hz)
F_0	Freqüência do instrumento, em (Hz)
g	Aceleração da gravidade, em (m/s^2)
H	Carga hidráulica, em (m)
h	Nível da água; profundidade média da seção, em (m)
h_v	Altura da lâmina d'água, em (m)
H_0	Hipótese nula
h_0	Nível correspondente à cota nula, em (m)
H_1	Hipótese alternativa
I	Declividade, em (m)
k	Módulo de elasticidade volumétrica
k_a, k_b, k_s	Coeficientes da sonda estática

k_c	Coeficiente da equação geral dos canais, em ($m/s^{0.5}$)
k_v	Coeficiente de aumento de velocidade
L	Largura da seção transversal; comprimento; distância, em (m)
m	Relação de diâmetros ao quadrado
N	Número de medições; número de pulsos acústicos
n	Número de rotações por segundo, em (rps)
N_{Re}	Número de Reynolds
p	Pressão, em (N/m^2); profundidade, em (m)
P_{din}	Pressão dinâmica, em (N/m^2)
p_{ej}	Pressão de estagnação a jusante, em (N/m^2)
p_{em}	Pressão de estagnação a montante, em (N/m^2)
P_{est}	Pressão estática, em (N/m^2)
PI	Ponto inicial de uma seção de medição
PF	Ponto final de uma seção de medição
Q, q	Vazão, em (m^3/s)
Q_m	Vazão média, em (m^3/s)
Q_t	Vazão total, em (m^3/s)
R	Alcance dos feixes acústicos, em (m)
r	coeficiente de correlação linear
R_H	Raio hidráulico, em (m)
s	Desvio-padrão experimental
T, t	Tempo, em (s)
t	Estatística de teste
U	Perímetro molhado médio, em (m); limite superior do erro
u, v, w	Componentes do vetor velocidade da água
V, v	Velocidade média da água; velocidade relativa, em (m/s)
V_a	Velocidade de ambigüidade, em (m/s)
V_b	Velocidade do barco, em (m/s)
V_e	Velocidade média estimada na subseção, em (m/s)
V_f	Velocidade do fluido, em (m/s)
V_m	Velocidade média medida na subseção, em (m/s)
X	Variável aleatória
\bar{X}, \bar{x}	Média aritmética ou esperança de uma série de medidas

x, y	Eixos coordenados
z	Cota, em (m)

SIMBOLOGIA GREGA

α	Nível de significância em um teste de hipóteses, em (%)
β	Erro sistemático
Δ	Diferença entre leituras
$\Delta h, \Delta p$	Diferença de pressão estática, em (m)
δ	Erro total da medição
ε	Erro aleatório
γ	Peso específico, em ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^2$)
λ	Coeficiente de perda de carga no injetor; comprimento de onda
μ	Média verdadeira; média dos desvios
θ	Coeficiente dimensional de sensibilidade
ρ	Massa específica, em (kg/m^3); coeficiente de correlação linear
σ	Desvio-padrão
σ^2	Variância
$\sigma^2(X)$	Desvio-padrão experimental
∂	Derivada parcial

RESUMO

No Brasil, um país que conta com 12% dos recursos hídricos disponíveis no planeta, cuja matriz de geração de eletricidade é 90% de origem hídrica, é fundamental a correta gestão dos recursos existentes. Esta necessidade cresce à medida que a sociedade se dá conta da importância da água para o desenvolvimento da nação.

Para uma gestão eficiente deste recurso, é necessário a disponibilização de dados hidrográficos consolidados sobre todas as bacias hidrográficas existentes no nosso território. Para tanto, há necessidade de freqüentes levantamentos dos dados junto às estações hidrométricas espalhadas em todo o território nacional.

O monitoramento das estações hidrométricas gera os dados essenciais para os estudos relacionados aos diversos usos do potencial hídrico existente e ao controle de cheias, entre outros usos da água. Portanto, há necessidade de se manter a periodicidade de medição das vazões nos milhares de estações que compõem a rede hidrométrica do país. Esta é a atividade principal das instituições mantenedoras da rede.

Para a realização das medições de vazão que possibilitam o levantamento e a atualização das curvas-chave das estações, normalmente utiliza-se o tradicional método do molinete, que oferece praticidade e boa precisão. Entretanto, este método demanda tempo para o levantamento dos perfis de velocidade. Este fato é agravado quando se trata de grandes rios, onde as larguras e as profundidades dificultam a aplicação do método e resultam em maiores imprecisões.

Atualmente, para medições em grandes rios, tem-se utilizado com muito sucesso o “Acoustic Doppler Current Profiler” – ADCP. Trata-se de um instrumento com aplicação relativamente simples e cujas medições resultam em maior quantidade de dados, obtidos em tempo real.

Tendo em vista que o uso do ADCP tem-se limitado aos grandes rios, o presente trabalho de dissertação pretendeu verificar a adequação do mesmo a pequenos e médios cursos d’água. Para tanto, foi desenvolvida uma série de testes e estudos com um ADCP, gentilmente disponibilizado pela Organização Mundial de Meteorologia - OMM, através da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL.

A maioria dos casos estudados apresentou desvios acima do aceitável, se comparados com os métodos tradicionais. Os resultados mais significativos encontrados

foram obtidos com o aparelho operando no modo 1, que é o modo adequado para medição de rios mais profundos.

O instrumento mostrou-se pouco adequado a rios com pequenas profundidades, em canais estreitos e em águas muito limpas, sem sólidos em suspensão. Entretanto, fazem-se necessários mais estudos, de modo a alcançar melhorias e experiência na operação e configuração do instrumento, permitindo obter melhores resultados em pequenos e médios cursos d'água.

ABSTRACT

In Brazil, a country that counts with 12% of the available hydro resources in the planet, whose electricity matrix of generation is 90% from water, it is fundamental the correct administration of the existent resources. This need increases as the society realizes about the importance of the water for the development of the nation.

For an efficient administration of this resource, it is necessary the availability of hydro data consolidated on all the basins existent in our territory. For so much, there is need of frequent survey of the data close to the stream gauge stations spread in the whole national territory.

The management of the stream gauge stations generates the essential data for the studies related to the several uses of the hydro potential existent and the control of flood, among other uses of the water. Therefore, it's necessary to keep the periodicity of discharge measurements in the thousands stations that compose the stream gauge stations net of the country. This is the main activity of the institutions responsible by the maintenance of the net.

For the accomplishment of the discharge measurements that facilitate the survey and the bringing up to date of the stage discharge curve of the stations, the traditional method of the propeller flowmeter is usually used, that offers praticidade and good precision. However, this method demands time for the survey of the speed profiles. This fact is worsened when it is great rivers, where the widths and the depths hinder the application of the method and result in larger imprecision.

Nowadays, for measurements in great rivers, it has been using with a lot of success the "Acoustic Doppler Current Profiler" - ADCP. It is an instrument with simple application and whose measurements result in precision and superior facility to the propeller flowmeter.

Considering that the use of ADCP has been limiting to the great rivers, the present dissertation work intended to verify the adaptation of this instrument in small and medium rivers. Therefore, a series of tests and studies were developed with an ADCP, kindly supplied by the World Organization of Meteorology - OMM, by means of Brazilian Electricity Regulatory Agency - ANEEL.

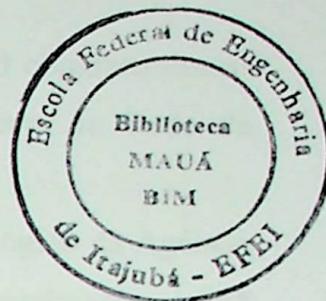
Most of the studied cases presented deviations above the acceptable limit, if compared with the traditional methods. The most significant results were obtained with

the instrument operating in mode 1, that is the mode adapted for measurement of deeper rivers.

The instrument was shown not very adequate to rivers with small depths, in narrow channels and in very clean waters, without suspended solids. However, more studies are necessary, in way to reach improvements and experience in the operation and configuration of the instrument, allowing to obtain better results in small and medium rivers.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO



O gerenciamento adequado dos recursos hídricos é de fundamental importância para o desenvolvimento de um país ou região, tendo em vista que a água é um recurso natural considerado como um bem econômico, mineral e energético. Em razão dessa importância e de crescentes preocupações ambientais nas diversas atividades desenvolvidas pelo homem, os conceitos de compartilhamento e gerenciamento das reservas finitas de água estão mudando. Há uma crescente competição entre os vários setores usuários: governo, irrigação, indústria, recreação, pesca, etc. Através de um conjunto de medidas técnicas, administrativas e legais, busca-se dar uma resposta eficaz às necessidades humanas e às exigências sociais para a melhor utilização da água.

As avaliações do uso da água são baseadas em consumo, desperdício, densidade populacional e impacto em ecossistemas e espécies em extinção. Os gestores do uso da água buscam as melhores tecnologias disponíveis para compartilhar seu uso. As melhores medidas de gerenciamento dependem da conservação da água, por isso, a utilização de bons métodos de medição é uma prática essencial. A conservação e a igual distribuição das reservas existentes de água é mais viável que a busca de novas fontes. Cada metro cúbico de água recuperado, como resultado do desenvolvimento de técnicas de medição, produz maior rendimento que a mesma quantidade obtida de uma nova fonte. Portanto, um bom gerenciamento deste recurso requer medições precisas (Water Measurement Manual, 1997).

A gestão dos recursos hídricos existentes, bem como o desenvolvimento de projetos e pesquisas no campo da hidrologia, prescinde do conhecimento dos regimes dos rios e suas sazonalidades, dos regimes pluviométricos e de mais uma série de informações do ciclo hidrológico das diversas regiões hidrográficas. O levantamento dessas informações deve ser realizado periodicamente, através de coleta e interpretação de dados, de modo a atender às necessidades de projetistas e estudiosos nas áreas relacionadas ao aproveitamento dos recursos hídricos. A confiabilidade desses dados é maior à medida que suas séries históricas se tornam mais extensas.

Essas informações básicas são coletadas de acordo com determinados métodos e

critérios em estações de medição, chamadas estações hidrométricas. O conjunto dessas estações forma uma rede e o conjunto dessas redes recebe o nome de Rede de Monitoramento Hidrológico.

Segundo Freitas et al. (1999), a Rede de Monitoramento Hidrológico da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL - mantém em operação, atualmente, 1.568 estações fluviométricas, de um total de 4.552 operadas em todo o território nacional. A operação dessas estações é feita através de medidas milimétricas diárias e medição de vazão durante as campanhas de medição. As campanhas realizadas nos grandes cursos d'água da Amazônia fazem parte do Projeto HiBAm - Hidrologia da Bacia Amazônica, onde já é utilizado, há vários anos, o instrumento Acoustic Doppler Current Profiler - ADCP - para a medição da vazão. Na maioria dos pequenos e médios cursos d'água, as campanhas ainda são realizadas com métodos tradicionais.

Neste trabalho são descritos vários métodos convencionais utilizados na coleta de dados de vazão, além do método acústico, do ADCP, de uso mais recente. Na tentativa de verificar a adequação desse último para uso em pequenos e médios cursos d'água, seus dados foram comparados com a curva-chave de uma estação fluviométrica e alguns dados obtidos através dos métodos do molinete e do vertedor. O ADCP já é largamente utilizado em oceanos e grandes cursos d'água, oferecendo muitas vantagens em relação aos instrumentos convencionais.

1.1 Objetivo do trabalho

A finalidade deste trabalho é verificar a adequação do uso do instrumento ADCP para uso em pequenos e médios cursos d'água, oferecendo maior praticidade e qualidade na medição da vazão.

1.2 Justificativa

No Brasil ainda existem regiões onde os dados hidrológicos básicos são reduzidos e, até mesmo, inexistentes, principalmente em épocas de cheias, apesar do grande desenvolvimento ocorrido nos últimos anos, na implantação da rede hidrometeorológica básica.

A rede hidrográfica brasileira está dividida em oito grandes bacias hidrográficas, nas quais é desenvolvido, por redes de monitoramento, um trabalho intenso de levantamento de dados básicos em todo o país.

Segundo Freitas et al. (1999), de acordo com as mencionadas redes, os totais drenados pelos rios, no território brasileiro, são estimados em 257.790 m³/s, em termos de descarga média de longo período. Cerca de 92% desse valor estão em seis grandes bacias hidrográficas, observando-se uma grande diversidade de situações, com abundância de água nas regiões Norte e Centro-Oeste e escassez na região Nordeste e em alguns estados desenvolvidos como Rio de Janeiro e São Paulo.

Em algumas bacias brasileiras, existem problemas sérios relacionados à secas e enchentes. Considerando que esses fenômenos não podem ser eliminados, é muito importante entendê-los e empreender ações mitigadoras, principalmente em seus piores impactos, assegurando ainda que as atividades humanas e mudanças no uso do solo não agravem esses problemas. Para minimizar os problemas com enchentes, deve-se fazer uso de medidas como alertas hidrológicos, que são baseados em séries históricas de longo período, no monitoramento dos cursos d'água em tempo real e nos prognósticos fornecidos através de modelos matemáticos.

A Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL tem como objetivo o levantamento das informações básicas para o desenvolvimento de projetos relacionados com recursos hídricos, controle quantitativo e qualitativo de águas das bacias hidrográficas e previsão de cheias, bem como à otimização dos recursos financeiros globais aplicados nos levantamentos de informações hidrometeorológicas. De acordo com esses objetivos, a Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas - SIH - tem procurado definir uma rede básica de estações pluviométricas e fluviométricas, dentro de um programa global de planejamento da Rede Básica Hidrometeorológica Nacional. Este planejamento envolve estações de diversas entidades, as quais por meio de convênios ou acordos, fornecem os dados hidrológicos a ANEEL/SIH, para alimentar o Banco de Dados e, assim, colocar as informações à disposição dos usuários.

Esses dados são imprescindíveis quando da realização de estudos e projetos envolvendo aproveitamentos hidráulicos, gerenciamento de recursos hídricos, caracterização das bacias hidrográficas brasileiras e outros itens de importância científica e sócio-econômica.

O uso de métodos e dispositivos automatizados como o ADCP, que mede a vazão automaticamente por meio do efeito Doppler, pode ser muito útil, agilizando o processo de aquisição dos dados.

Em uma análise da relação custo-benefício da hidrometria, tem-se que, pelo

levantamento realizado em 1998, existem no país 11.110 estações hidrológicas em operação; considerando um custo médio de R\$ 3.000,00 por estação/ano, chega-se a uma quantia anual de R\$ 33.330.000,00 como custo médio anual para operação e manutenção das estações em operação no país. Estas estações geram informações imprescindíveis para os setores agrícola, pecuário, de transporte, de saúde, de segurança (defesa civil) e energético.

Fazendo uma análise expedita da relação custo-benefício, tomando como base o setor energético, tem-se que a rede hidrométrica sob administração da ANEEL, com custo anual próximo a R\$ 15.000.000,00, considerando também que no país existem aproveitamentos hidrelétricos com capacidade total instalada superior a 54.000 MW e tomando o valor de R\$ 1.300,00 como custo médio do quilowatt instalado, chega-se a um custo total de 70,2 bilhões de reais. Este valor corresponde ao investimento na construção das usinas hidrelétricas, sem considerar os custos das linhas de transmissão. Supondo que, na época do desenvolvimento dos projetos dessas usinas, não estivessem disponíveis as informações hidrológicas necessárias aos cálculos envolvidos no projeto e que fosse necessário utilizar um coeficiente de segurança de 5% a mais, em razão de informações hidrológicas insuficientes, haveria, consequentemente, um acréscimo de custo para os aproveitamentos hidrelétricos existentes de 3,5 bilhões de reais. Este recurso é suficiente para operar a rede básica por 233 anos, isto considerando o benefício somente para os projetos de instalação das hidrelétricas (Freitas et al., 1999).

1.3 Plano de Trabalho

Para a realização do trabalho, foi previsto o desenvolvimento das seguintes etapas:

- Estudo e discussão dos trabalhos já realizados com o referido instrumento;
- Seleção de estações fluviométricas a serem utilizadas no trabalho;
- Realização de medições de vazão, utilizando o método dos molinetes e o método acústico do ADCP nas estações selecionadas;
- Comparação dos resultados obtidos, utilizando também as curvas-chave das estações selecionadas, para verificação da precisão do método;
- Elaboração de uma metodologia para uso do ADCP nas condições impostas.

1.4 Conteúdo do Trabalho de Dissertação

No capítulo 2, é feita uma revisão bibliográfica com apresentação dos trabalhos já realizados com o ADCP em diversas situações e as conclusões de cada um deles.

O capítulo 3 apresenta alguns conceitos básicos de hidrometria e uma descrição dos equipamentos e métodos tradicionais utilizados na medição da vazão, com comentários sobre a importância de cada um deles.

O instrumento ADCP, seu princípio de funcionamento e alguns conceitos básicos para sua compreensão são descritos no capítulo 4.

Os procedimentos, prévios e posteriores, e a metodologia de medição de vazão utilizando o ADCP em pequenos e médios cursos d'água são apresentados no capítulo 5.

No capítulo 6, são apresentados e analisados os resultados obtidos neste trabalho.

As conclusões deste trabalho e as recomendações para estudos futuros são apresentadas no capítulo 7.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Simpson e Oltmann (1993), várias medições foram realizadas com o ADCP no Rio Sacramento, próximo a Freeport, Califórnia, e comparadas com dados fornecidos por um medidor ultra-sônico de velocidade localizado na mesma seção de medição. No trabalho, o ADCP foi utilizado para coletar dados através de várias técnicas de medição de vazão. Durante as travessias para a coleta de dados, as velocidades do barco foram variadas. No programa computacional Transect, usado com o ADCP, foram utilizados períodos diferentes para cálculo da média das velocidades obtidas; também foram utilizadas trajetórias diferentes para o barco durante as medições, como diagonal, curva *s* e figura oito. O transdutor também foi girado ao longo de 360°, durante várias travessias para coleta de dados.

A velocidade do barco durante a travessia e os diferentes períodos para cálculo da média, tiveram um efeito significativo na precisão das medições de vazão porque eles determinam indiretamente o número de subseções de medição coletadas durante a travessia da seção. A trajetória do barco e a rotação do transdutor tiveram pequeno efeito (menos que 2%) na precisão das medições de vazão. Entretanto, o sinal (\pm) dos valores das subseções mudou quando o transdutor foi girado em 180°. A comparação dos resultados mostrou que as vazões fornecidas pelo ADCP tinham uma diferença em torno de 2% em relação às fornecidas pelo medidor ultra-sônico, como pode ser visto na figura 2.1.

Este trabalho apresentou resultados, em geral, bastante satisfatórios. Entretanto, ficou constatado que a velocidade do barco deve ser lenta durante a travessia da seção, para que um número maior de amostras seja coletado, reduzindo o erro médio no cálculo da vazão. Assim, a velocidade do barco nunca deve ultrapassar a máxima velocidade da água na seção. Também se verificou que não importa qual seja a trajetória realizada pelo barco durante a medição ou a posição do transdutor com relação à rotação, pois esses fatores pouco influenciam a precisão.

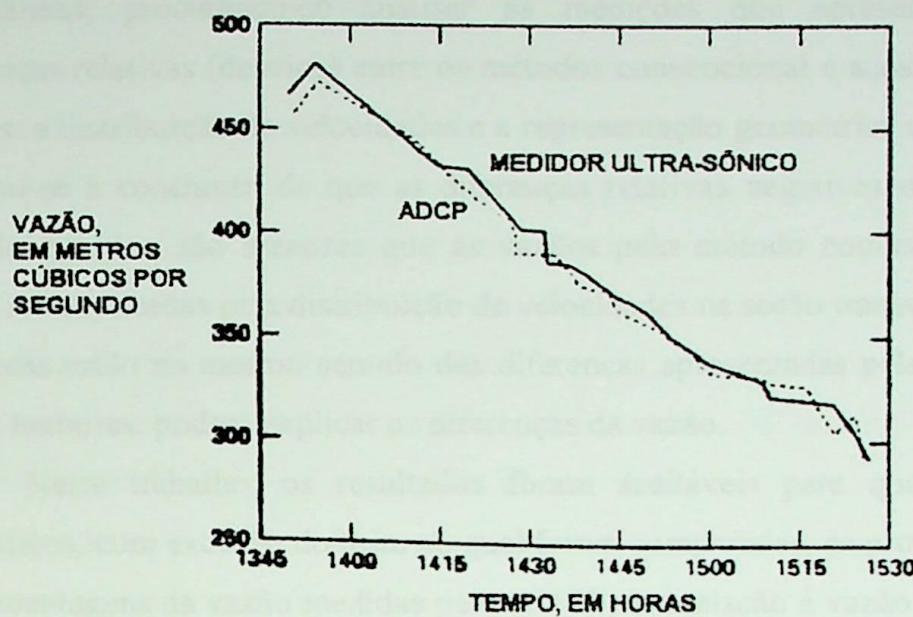


Figura 2.1 - Comparação entre medições realizadas com ADCP e com um medidor ultra-sônico.

Segundo Santos et al. (1997) e Gomes et al. (1999), em medições simultâneas de vazões realizadas com o ADCP e o método convencional em várias estações fluviométricas, os dados obtidos foram submetidos a alguns testes estatísticos. Nestes testes foram determinadas: a média dos desvios, a reta de regressão entre os desvios e alguma característica da medição, e a reta de regressão entre as vazões medidas pelos dois métodos. O objetivo dos testes era verificar se a relação entre as vazões podia ser representada por uma reta a 45° , passando pela origem, o que indica valores de vazão iguais pelos dois métodos em estudo. Os resultados demonstraram que as hipóteses testadas foram aceitas para um nível de significância, ou erro tolerado, de 5%. Em comparação entre as medições de vazão e as curvas-chave, foram realizados os mesmos testes, obtendo-se resultados semelhantes. Exceção feita ao teste para a profundidade média e a porcentagem da vazão medida em relação à vazão total, onde a hipótese testada foi rejeitada ao nível de significância de 5%, sugerindo que quanto maiores a profundidade média e a porcentagem da vazão medida pelo ADCP em relação à vazão total, menores os desvios.

Contudo, verificou-se que as diferenças observadas entre as vazões medidas pelos dois métodos não podem ser explicadas pela análise conjunta das medições realizadas. Conseqüentemente, procedeu-se a uma análise mais detalhada das medições

simultâneas, procurando-se analisar as medições que apresentaram as maiores diferenças relativas (desvios) entre os métodos convencional e acústico, através de dois fatores: a distribuição de velocidades e a representação geométrica da seção transversal. Chegou-se à conclusão de que as diferenças relativas negativas onde as vazões pelo método acústico são menores que as vazões pelo método convencional, podem, em parte, ser explicadas pela distribuição de velocidades na seção transversal. As diferenças das áreas estão no mesmo sentido das diferenças apresentadas pela vazão e, apesar de serem menores, podem explicar as diferenças da vazão.

Neste trabalho, os resultados foram aceitáveis para quase todos os testes estatísticos, com exceção do teste no qual foram comparadas, as profundidades médias e as porcentagens da vazão medidas pelo ADCP, em relação à vazão total. Este resultado mostra que os desvios entre as medições são menores à medida que aumentam a profundidade e a porcentagem da vazão medida. Também foi verificado que a distribuição de velocidades e a representação geométrica da seção podem, em parte, ser responsáveis pelas diferenças de vazão.

Segundo González et al. (1996), em comparação de distribuições de velocidade aproximadamente bidimensionais em um canal aberto, com as curvas de distribuição de velocidade logarítmica e de potência, os resultados indicaram que ambas as curvas se ajustam bem aos perfis de velocidade medidos. Os dados foram coletados com um ADCP fixo no Chicago Sanitary and Ship Canal (CSSC), em Romeoville, Illinois, e separados em dois conjuntos de dados. Os coeficientes de determinação, obtidos da análise de regressão não-linear para cada distribuição teórica, são praticamente iguais. Os desvios dos perfis de velocidade medidos, obtidos do segundo conjunto de dados (25 perfis), em relação aos perfis de velocidade teóricos parecem resultar do período utilizado para o cálculo da média. Os resultados das análises feitas no segundo conjunto de dados indicaram que os desvios de estimativa de velocidade média, baseados em 20 perfis sequenciais, estão, aproximadamente, dentro da metade do desvio padrão da velocidade média determinada no mesmo rio. Baseado nestes resultados, e assumindo que o coeficiente de variação do primeiro conjunto de dados é transferível ao segundo, os desvios são de aproximadamente $\pm 5\%$ para a velocidade da água.

A velocidade de escoamento e a rugosidade de areia equivalente de Nikuradse foram estimadas ajustando-se os dados à curva logarítmica. Os valores da rugosidade de

areia equivalente, independentemente estimados de cada conjunto de dados, foram muito similares. Os expoentes estimados da curva de potência para os dois conjuntos de dados estão bem próximos de 1/6, o que liga a curva de potência com a equação de Manning para fluxo uniforme em canais largos.

Segundo os mesmos autores (1996), a precisão do ADCP para medir velocidades em locais próximos a paredes laterais, onde o fluxo parte de um comportamento bidimensional tem ainda que ser estudada.

Este trabalho mostrou que ambas as curvas de distribuição de velocidade teóricas, logarítmica e de potência, se ajustam bem aos perfis de velocidade medidos com o ADCP. Contudo, foi verificado, como no primeiro trabalho apresentado (Simpson e Oltmann, 1993), que o período utilizado para o cálculo da média pode ter sido responsável pelos desvios entre os dois métodos comparados. Neste trabalho, chegou-se à conclusão de que a precisão do ADCP para medir velocidades em locais próximos a paredes laterais tem ainda que ser estudada.

Segundo Morlock (1996), em trinta e uma medições de vazão realizadas com o ADCP, com o objetivo de avaliar seu comportamento em vários rios com diferentes condições, os resultados diferiram, no máximo, 8% das medições realizadas com métodos convencionais. Os dados foram coletados em doze estações fluviométricas da United States Geological Survey - USGS, com um ADCP - 1200 kHz em cinco das estações, com um ADCP - 600 kHz em duas e, com ambos os modelos, em cinco estações. As medições foram comparadas a vazões obtidas por métodos convencionais, calculadas para o mesmo período considerado para o ADCP. As estações avaliadas cobrem uma extensa área geográfica e representam uma grande variedade de características fluviais. As larguras das seções variaram de, aproximadamente, 43 a 1.097 m. A seção mais rasa tinha uma profundidade média de 1,5 m e máxima de 2 m. A seção mais profunda tinha uma profundidade média em torno de 6,4 m e máxima de, aproximadamente, 9 m. As velocidades médias variaram de 0,2 a 1,2 m/s. As vazões variaram de 21,7 a 1.693,5 m³/s. As seções variaram de uniformes e profundas a irregulares e rasas. Várias delas eram mais profundas em um dos lados. Outras características também variam, como tipos de leito: de lisos, com areia e silte, a pedregosos; e taxas de turbidez, etc. As condições de fluxo na maioria das seções eram

estáveis e uniformes, com exceção de uma, onde o fluxo era turbulento, com ondas e redemoinho em um lado do rio.

Para a avaliação da qualidade dos dados obtidos com o ADCP, foram considerados dois critérios: intensidade dos ecos que retornam das partículas em suspensão na água e correlação entre os ecos de duplas de pulsos acústicos. O primeiro critério foi satisfeito para todas as estações e o coeficiente obtido para o segundo critério ficou dentro dos limites aceitáveis. O único problema constatado foi o de terem sido usadas células de profundidade menores que as recomendadas pelo fabricante para o ADCP - 600 kHz, em quatro das estações avaliadas. Isto causou a produção de falsas velocidades nestas células.

Vinte e cinco das medições diferiram, no máximo, 5% das vazões obtidas das curvas-chave das estações. Seis das medições, que foram realizadas em dois dos locais avaliados, diferiram mais que 5% das curvas-chave; a maior diferença foi de 7,6%. Os desvios-padrão nas subseções medidas, calculados como porcentagem da vazão total de cada medição correspondente, foram de, geralmente, menos que 2%. O erro das medições foi indicado pelos desvios-padrão, que variaram de 1 a 7%. O erro estimado também foi calculado através de fórmulas fornecidas pelo fabricante, assumindo que os erros devidos ao instrumento e à extração de subseções não medidas, são sua principal fonte. Os desvios foram maiores que os erros estimados para a maioria das medições com o ADCP, indicando que os componentes significantes do erro não estavam relacionados com o instrumento; os erros desta natureza incluem variações temporárias no fluxo. Através destes resultados, chegou-se à conclusão de que a precisão pode ser bastante afetada pela seleção do local de medição, ou seja, a realização de medições em locais onde há pouca variação no fluxo pode melhorar a precisão. Ela também pode ser afetada por fatores relacionados ao instrumento e à operação do barco.

Neste trabalho, verificou-se que a maioria das medições realizadas com ADCP diferiu, no máximo, 5% das vazões obtidas das curvas-chave. Através da avaliação destas medições realizadas com o ADCP, foi constatado que, apesar da seleção do local de medição influir bastante na precisão da medição, ele pode ser utilizado com sucesso sob variadas condições.

Foram realizadas, por uma equipe da Central Hidrelétrica de Itaipu, medições em rios médios e pequenos com o ADCP Rio Grande - 600Khz. Os rios tinham largura entre 20 e 200 m e estavam rasos por causa da estiagem. Então, ou estavam muito rasos (de 0,9 a 9 m) ou quase sem velocidade, o que consistiu um problema. As medições realizadas com o modo de operação 1, não foram aceitáveis. As medições que utilizaram o modo 5, não foram completas. Este fato é devido ao limite de profundidade aceito pelo modo 5, que é de 7 m, enquanto o rio tinha 9 m. Nas medições com o modo 8, os desvios foram de 3,7% a 17,7%. Os desvios maiores aconteceram nas primeiras medições, onde os rios apresentavam as características descritas acima. Os menores aconteceram em um rio com velocidade pequena e profundidade de 4,5 m. Houve um caso em que o erro das medições foi de 2,3%, mas o rio era mais coerente em seu fluxo e profundidade. Foi realizada também uma medição onde o desvio foi de 5,9%, em um rio com 20 m de largura e profundidade máxima de 1 m. Em todas as medições, porém, houve perda de amostras.

Vários estudos foram realizados no intuito de determinar a precisão do ADCP para medições em várias situações, obtendo, na maioria dos casos, bons resultados. No entanto, por tratar-se de uma tecnologia relativamente nova, há necessidade de avaliações freqüentes deste instrumento, até que seja atingido um bom grau de confiabilidade.

CAPÍTULO 3

EQUIPAMENTOS E MÉTODOS TRADICIONAIS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO

3.1 Histórico

Segundo consta no Curso de Hidrometria do Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE (1991), o estabelecimento de relações entre velocidades, medidas com o uso de flutuadores, e declividades dos cursos d'água serviram de base para os primeiros trabalhos de medição de vazão. Tais trabalhos foram registrados entre 1809 e 1926, sendo este método aplicado para obtenção de estimativas diárias de vazão do Rio Rhine, na Suíça. Parece ser o mais antigo registro contínuo de vazões, efetuado num período considerável de tempo.

Há também registros de vazão do Rio Tibre, na Itália, anteriores a 1836, e dos Rios Adda e Pó, anteriores a 1844, medidas de forma similar. O Rio Ohio, nas proximidades de Wheeling, foi exaustivamente medido com flutuadores para vários níveis d'água.

Posteriormente, foi deduzida uma fórmula empírica, relacionando o nível d'água com a vazão. Através do registro do nível da água, medido por uma régua, e com base nessa fórmula, obtiveram-se registros diários de vazão para os anos de 1844 e 1848.

No Brasil, os levantamentos hidrológicos tiveram início há mais de cem anos, quando foram instaladas as primeiras estações pluviométricas com medições regulares. Posteriormente, foram iniciadas as implantações de estações com controle de níveis e medições de vazões, com o objetivo de atender às necessidades de aproveitamento das forças hidráulicas. As primeiras atividades de coleta de dados hidrometeorológicos foram realizadas pelo Departamento Nacional de Obras contra a Seca - DNOCS - e pelo Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, com a instalação de suas estações mais antigas. No setor privado há que se destacar algumas estações da São Paulo Light and Power (1909).

A partir do início do século, a hidrometria passou a ser realizada de maneira mais organizada, evoluindo gradativamente tanto em metodologia operacional quanto em locais monitorados.

Ultimamente, assiste-se a uma grande mudança, em função dos novos equipamentos de hidrometria disponibilizados no mercado, que têm facilitado o trabalho de campo e aumentado a confiabilidade das informações coletadas.

3.2 Conceitos Básicos

3.2.1 Hidrometria

Hidrometria é a parte da Hidráulica que se ocupa da determinação das vazões dos escoamentos. Para que a determinação desta grandeza dependente possa ser feita, torna-se indispensável a medição de grandezas independentes do escoamento e no escoamento.

Medir uma grandeza é compará-la com outra da mesma natureza, tomada como termo ou padrão de referência, logo sujeita a erros, mesmo que o padrão seja considerado isento de erro e de desvio.

3.2.2 Escoamento em Canais Abertos

O escoamento em canais abertos ou à superfície livre ocorre quando uma parte do seu contorno está em contato com a atmosfera; é o caso dos canais, galerias e cursos d'água naturais, com seções transversais de vários formatos.

3.2.2.1 Tipos e Regimes de Escoamento

O escoamento em canais abertos pode ser:

- Quanto à variação no tempo de movimento: permanente ou não permanente;
- Quanto à variação no espaço: uniforme ou variado.

O escoamento depende do fator cinético que é definido pelo número de Froude (tabela 3.1), um importante parâmetro adimensional que relaciona a força de inércia e a força da gravidade, sendo expresso pela fórmula:

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{g \cdot h}} \quad (3.1)$$

Onde:

v = velocidade média na seção.

g = aceleração da gravidade.

h = profundidade média da seção ou $A/L = \text{Área da seção}/\text{Largura da seção}$, para seção normal.

O número de Froude define se o regime do escoamento é fluvial, crítico ou torrencial:

Tabela 3.1 - Regimes de escoamento, de acordo com o número de Froude.

• Se $F_r < 1 \Rightarrow v < \sqrt{g \cdot h}$	Regime fluvial, onde as perturbações se propagam para montante.
• Se $F_r > 1 \Rightarrow v > \sqrt{g \cdot h}$	Regime torrencial, onde as perturbações não se propagam para montante.
• Se $F_r = 1 \Rightarrow v = \sqrt{g \cdot h}$	Regime crítico, o escoamento tem velocidade crítica.

3.2.3 Vazão ou descarga líquida

Segundo Pinto et al. (1976), a vazão ou a descarga líquida numa determinada seção de um rio (Q) é definida como sendo o volume de água que passa nessa seção na unidade de tempo e pode ser medida pelo produto da área da seção (A) pela velocidade média da água que atravessa a mesma (V), isto é, $Q = V \cdot A$.

Os métodos de medição mais utilizados avaliam a vazão através de elementos de área da seção transversal (A_i), como mostra a figura 3.1. A vazão final (Q) será o somatório dos elementos de vazão (q_i). Isso significa que $Q = \sum q_i = \sum V_i A_i$, onde V_i é a velocidade média da água através do elemento de área A_i .

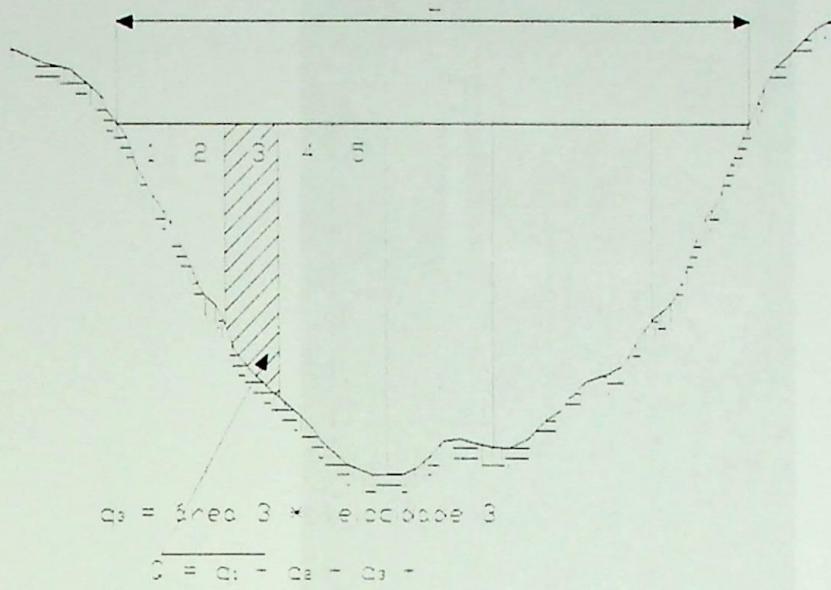


Figura 3.1 - Esquema do método área-velocidade para cálculo da vazão.

3.2.4 Estação Fluviométrica

Entende-se por estação fluviométrica a seção transversal de um curso d'água na qual se procura estabelecer uma relação entre as vazões que passam por esta seção e os níveis de água observados. A estação é definida, fisicamente, por uma escala fluviométrica (réguia limnimétrica), uma seção de medição e marcos de concreto para controle de cota (referências de nível ou RNs), como mostra a figura 3.2. O nível do curso d'água deve ser observado diariamente na réguia e registrado pelo observador.

As estações fluviométricas devem, por um lado, permitir o estabelecimento de uma lei bem definida, relacionando os níveis de água e as vazões; e, por outro, propiciar condições favoráveis às medições de vazão, que podem ser resumidas nos seguintes requisitos:

- Localização em trecho mais ou menos retilíneo do rio, com margens bem definidas e livres de pontos singulares que possam perturbar sensivelmente o escoamento;
- Seção transversal, tanto quanto possível, simétrica e com taludes acentuados;
- Velocidades regularmente distribuídas;
- Velocidade média superior a 0,3 m/s.



Figura 3.2 - Seção de réguas da estação fluviométrica PCH Luiz Dias.



Figura 3.3 - Medição de vazão a vau com barco na estação fluviométrica Luiz Dias, localizada na PCH Luiz Dias, Rio Lourenço Velho, Itajubá - MG.

3.2.5 Seção de Medição

Uma estação fluviométrica pode ter várias seções de medição, porém, o mais conveniente é que ela seja única e próxima do local de instalação da réguas.

A medição pode ser feita a vau ou com uso de barco (figura 3.3) e guincho

hidrométrico, nas vazões baixas e médias, e com cabo aéreo ou de cima de uma ponte ou pinguela, nas vazões altas (figura 3.4).

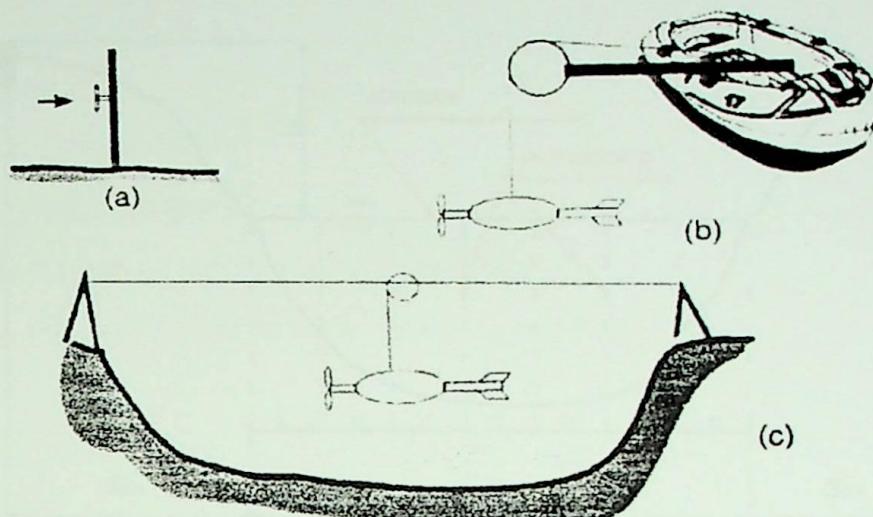


Figura 3.4 - (a) Haste com molinete hidrométrico (medição a vau); (b) Barco com guincho hidrométrico; (c) Seção de medição com cabo aéreo.

3.2.6 Batimetria

Os levantamentos topográficos são imprescindíveis para os estudos de aproveitamento múltiplo de uma bacia hidrográfica, ou estudos em um simples curso d'água, tais como: projeto de uma ponte, estudo morfológico de um rio ou estuário, erosão ou assoreamento de um canal, porto ou barragem, impacto no meio ambiente, etc.

Os levantamentos acima da superfície d'água são executados pelos métodos da topografia convencional. Dá-se o nome de batimetria ao levantamento topográfico da faixa predominante de ocupação do rio, ou seja, a topografia da parte molhada e uma faixa das margens, como mostra a figura 3.5.

Em pequenos e médios cursos d'água, os levantamentos batimétricos devem obedecer aos seguintes passos:

- Implantação de referências horizontais e verticais;
- Implantação da seção transversal;
- Amarração topográfica;

- Levantamento da parte molhada;
- Apuração.

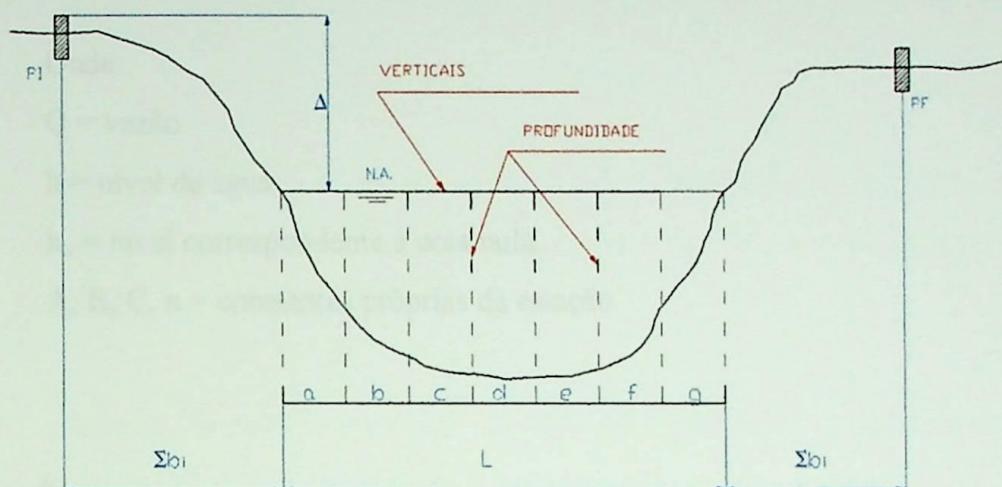


Figura 3.5 - Esquema para realização da batimetria.

3.2.7 Curva-chave

A curva-chave é o gráfico que relaciona níveis de água observados com suas respectivas vazões. Ela é válida somente para o local específico onde foi determinada.

Considerando-se que é bem mais fácil medir níveis d'água do que vazões, a curva-chave torna-se uma das ferramentas mais valiosas para o conhecimento do regime de variação de vazões diário de um curso d'água.

Existem três tipos de curva-chave:

- curvas estáveis e unívocas (figura 3.6);
- curvas estáveis influenciadas pela declividade - estações que têm controle variável com a cota (figura 3.7);
- curvas instáveis - estações em rios de leito móvel. A curva tem validade para períodos limitados.

Quanto maior o número de medições, melhor a definição da curva. Geralmente, a curva resultante tem aspecto parabólico, sendo possível expressá-la por equações da forma:

$$Q = A + B \cdot h + C \cdot h^2 \quad (3.2)$$

$$Q = A (h - h_0)^n \quad (3.3)$$

Onde:

Q = vazão.

h = nível de água.

h_0 = nível correspondente à cota nula.

A, B, C, n = constantes próprias da estação.

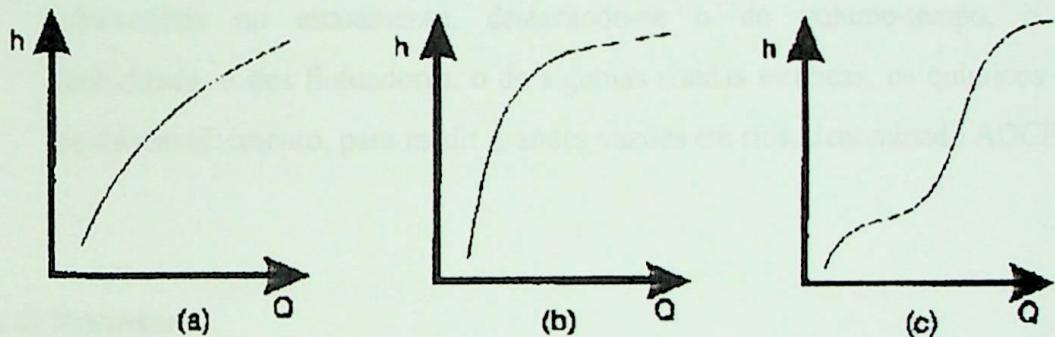


Figura 3.6 - Curvas-chave unívocas.

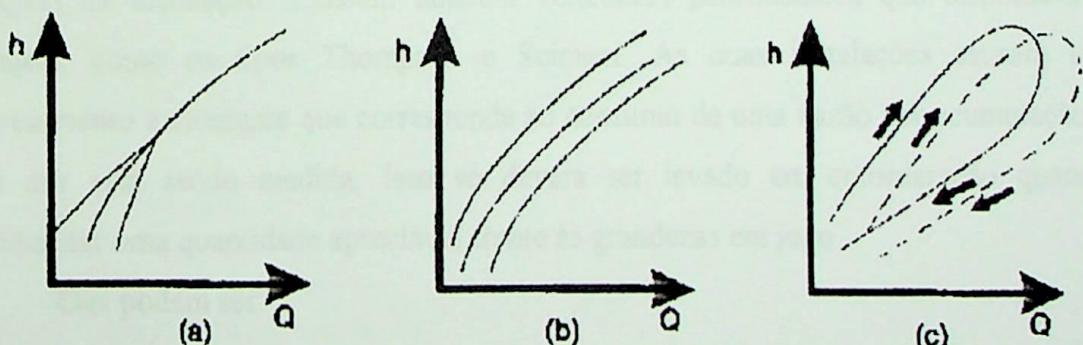


Figura 3.7 - Curvas-chave não-unívocas com seção ou controle instável.

3.3 Equipamentos e métodos tradicionais utilizados na medição da vazão

Os métodos tradicionais utilizados para medir a vazão de rios podem ser divididos em:

- *Métodos diretos*, que são os que provocam modificações locais substanciais no escoamento, destacando-se o dos vertedores, o das calhas, o de algumas sondas estáticas e o dos molinetes.
- *Métodos indiretos*, que são os que não provocam modificações locais substanciais no escoamento, destacando-se o do volume-tempo, o da declividade, o dos flutuadores, o de algumas sondas estáticas, os químicos e o em desenvolvimento, para medir grandes vazões em rios, denominado ADCP.

3.3.1 O Vertedor

O vertedor é um barramento construído e instalado transversalmente aos cursos d'água e serve para represamento, medidor de descarga e controlador do nível d'água.

Conhecendo-se a espessura da lâmina de água sobre o vertedor, pode-se determinar a vazão através de tabelas ou gráficos, desde que se proceda, previamente, a taragem da instalação. Existem também vertedores padronizados que dispensam a taragem, como os tipos Thompson e Scimeni. As duas instalações causam um represamento a montante que corresponde ao consumo de uma vazão por acumulação e que não está sendo medida. Isso só deverá ser levado em consideração quando representar uma quantidade apreciável frente às grandezas em jogo.

Eles podem ser:

- de soleira delgada;
- de soleira espessa;
- de soleira curta;
- para barragens.

3.3.1.1 Vertedor de soleira delgada

Este tipo de vertedor é utilizado em pequenos cursos d'água e canais de irrigação, onde a variação da vazão não é muito grande.

O formato da soleira, em geral, é uma figura geométrica comum, tal como: triângulo, retângulo e trapézio.

3.3.1.2 Vertedor de soleira espessa

Os vertedores de soleira espessa são estrangulamentos num pequeno trecho do curso d'água, com elevação do fundo ou contração das margens, ou os dois, formando uma figura geométrica, onde pode ser determinada a vazão.

O vertedor é considerado de soleira espessa, quando:

- a) ocorre o escoamento de regime crítico no medidor, com descarga livre;
- b) as linhas de corrente são paralelas, para que se possa admitir uma distribuição de pressão hidrostática sobre a soleira.

Pode-se construir vertedores de soleira espessa com várias figuras geométricas, tais como: triângulo, retângulo, trapézio, parábola, círculo, etc. (figura 3.8)

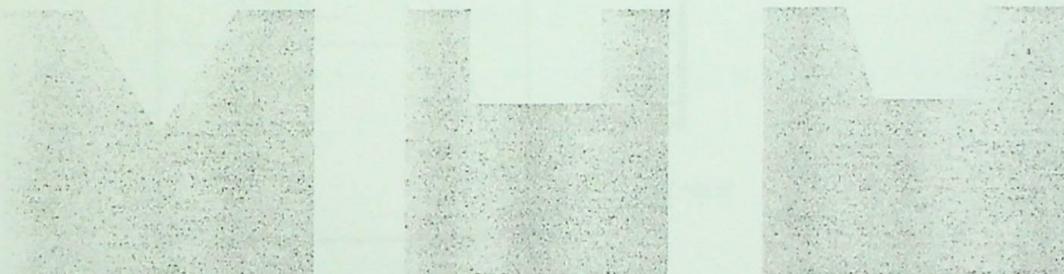


Figura 3.8 - Formatos de soleira.

3.3.1.3 Vertedor de soleira curta

Neste vertedor as soleiras não apresentam arestas vivas e não são suficientemente espessas, para nelas se estabelecer o paralelismo das linhas de corrente.

Pode-se construir vertedores de soleira curta de vários formatos, tais como: perfis trapezoidais, triangulares e Crump. Foram estudados outros perfis, tais como: circulares, vigas e soleiras WES.

3.3.1.4 Vertedores especiais (para barragens)

As barragens são providas de vertedores, com grande capacidade de vazão, para extravasar as enchentes, denominados de vertedores com perfil normal.

Alguns dos perfis utilizados para este tipo de vertedor, são os de Creager e de Scimeni (figura 3.9), cujas equações referidas ao eixo de origem S são dadas abaixo.

Para o Perfil Creager, a equação é dada por:

$$y = 0,47 \cdot \frac{x^{1,80}}{H^{0,80}} \quad (3.4)$$

Para o Perfil Scimeni, tem-se:

$$y = 0,50 \cdot \frac{x^{1,85}}{H^{0,80}} \quad (3.5)$$

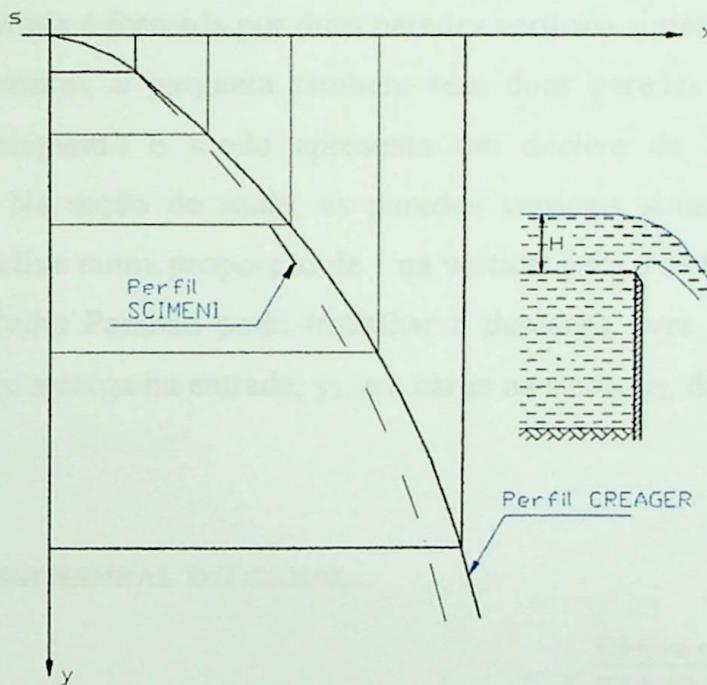


Figura 3.9 - Vertedores de Creager e de Scimeni.

O vertedor tem a desvantagem de elevar mais o nível da água que a calha, a qual permite, mais facilmente, a passagem dos materiais arrastados pelo rio. No vertedor há a necessidade de limpeza constante.

3.3.2 A Calha

Qualquer dispositivo que provoque a passagem do escoamento do rio de um regime fluvial a um torrencial serve para esse tipo de medida. A mudança no regime obriga a existência de profundidade crítica dentro da instalação. A vazão será função dessa profundidade e das características do medidor. Haverá a formação de um ressalto a jusante se o escoamento for fluvial em condições naturais.

Foram desenvolvidos diversos medidores de vazão baseados no escoamento em regime crítico. Os mais conhecidos são: calha Parshall, calha garganta-cortada e calha Palmer-Bowlus.

A calha Parshall é a mais conhecida e utilizada nas indústrias e estações de tratamento de água.

3.3.2.1 Calha Parshall

Esta calha é constituída de três partes fundamentais: a entrada, a garganta e a saída. A entrada é formada por duas paredes verticais simétricas e convergentes, tendo o fundo horizontal, a garganta também tem duas paredes verticais simétricas, porém paralelas, enquanto o fundo apresenta um declive de 2,67 na vertical para 1 na horizontal. Na seção de saída, as paredes verticais simétricas são divergentes, com fundo em acente numa proporção de 1 na vertical para 6 na horizontal.

A Calha Parshall pode trabalhar à descarga livre ou afogada, dependendo da relação entre a carga na entrada, y_1 , e a carga na saída, y_2 , do medidor (figura 3.10).

PERFIL LONGITUDINAL DO CANAL

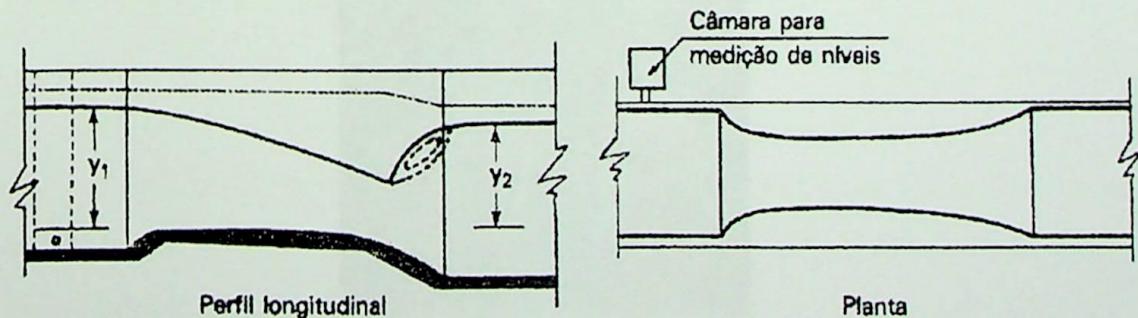


Figura 3.10 - Calha Parshall.

3.3.3 O Molinete hidrométrico

O molinete é um aparelho dotado de pás ou hélice que giram sob a ação da corrente de água. A relação entre o número de rotações e a velocidade da água é dada pela equação do molinete, em geral da forma:

$$V = a \cdot n + b \quad (3.4)$$

Onde:

V = velocidade da água (m/s);

n = número de rotações por segundo (rps);

a e b = constantes que individualizam cada aparelho e são obtidas por calibração em laboratório.

O molinete é um instrumento utilizado para medição de velocidade pontual. Cada velocidade pontual é atribuída a uma parte significante da seção transversal por onde passa a vazão a ser medida. A área dos perfis de velocidade medidos é usada para o cálculo da vazão total, que é determinada pela soma de vazões parciais.

Existem, basicamente, dois tipos de molinete: os de eixo vertical (figura 3.11), dotados de conchas que giram ao redor desse eixo, e os de eixo horizontal, dotados de uma hélice, que são mais precisos que os primeiros.

O método dos molinetes é o mais comumente utilizado devido à sua precisão e facilidade de execução.

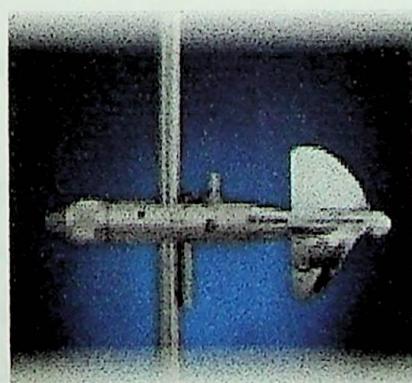


Figura 3.11 - Molinete de eixo horizontal.

3.3.3.1 Medida de velocidade

Segundo consta no Curso de Hidrometria do DAEE (1991), a velocidade da água é medida em vários pontos da vertical com o molinete, utilizando-se o processo mais adequado dos descritos abaixo:

a) Processo dos pontos múltiplos

Realiza-se uma medida próxima à superfície (a 0,10 m de profundidade) e uma próxima ao fundo (a 0,15 m do leito do canal), conforme figura 3.12. Entre esses dois extremos, mede-se a velocidade em vários pontos, de modo a se conseguir traçar a curva de velocidades em função da profundidade. A velocidade superficial pode ser considerada como sendo igual à medida a 0,10 m e a de fundo igual à metade daquela medida a 0,15 m.

Calculando-se a área desse perfil e dividindo-se pela profundidade, tem-se a velocidade média na vertical.

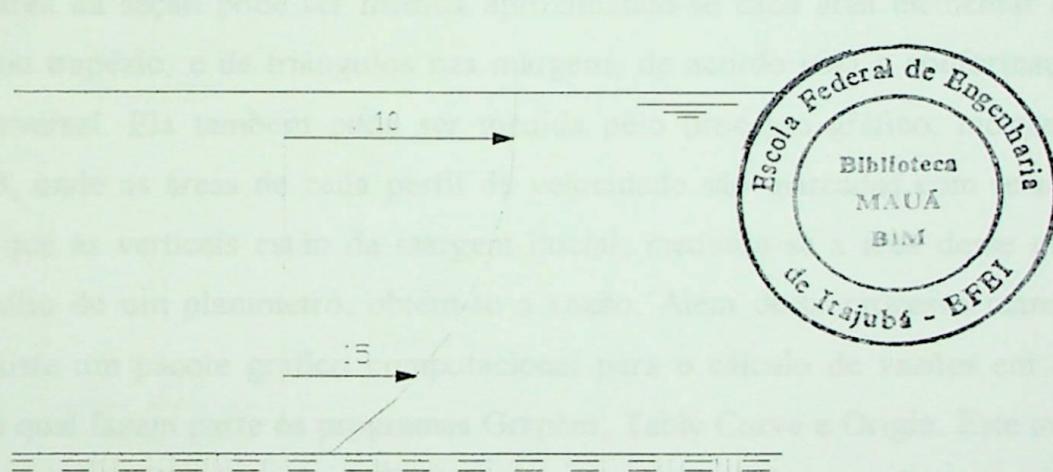


Figura 3.12 - Velocidades próximas à superfície e ao fundo do canal.

b) Processo dos dois pontos

Verificou-se, pela experiência acumulada, que a velocidade média obtida com o processo dos pontos múltiplos era muito próxima daquela obtida pela média das velocidades medidas a 20 e 80% da profundidade.

Este é o método mais utilizado, devido à rapidez com que se pode efetuar as medições, obtendo-se precisão aceitável. Em alguns casos, pode-se acrescentar a medição a 60% da profundidade.

c) Processo do ponto único

O processo dos dois pontos é limitado a profundidades maiores que 1 m. Em profundidades menores ou iguais a 1 m, a velocidade pode ser medida somente a 60% da profundidade, sendo aproximadamente igual à velocidade média, porém, com menor precisão.

d) Processo por integração

Neste processo, onde só pode ser utilizado o molinete de eixo horizontal, o aparelho é deslocado na vertical com movimento constante, anotando-se o tempo de operação e o número de rotações. Dividindo-se o número de rotações pelo tempo, tem-se a velocidade média de rotação, que possibilita, através da equação do molinete, a obtenção da velocidade média.

3.3.3.2 Medida de área

A área da seção pode ser medida aproximando-se cada área elementar de um retângulo ou trapézio, e de triângulos nas margens, de acordo com a conformação da seção transversal. Ela também pode ser medida pelo processo gráfico, mostrado na figura 3.13, onde as áreas de cada perfil de velocidade são marcadas com relação às distâncias que as verticais estão da margem inicial; medindo-se a área desse gráfico, com o auxílio de um planímetro, obtém-se a vazão. Além deste processo manual de cálculo, existe um pacote gráfico computacional para o cálculo de vazões em canais abertos, do qual fazem parte os programas Grapher, Table Curve e Origin. Este método computacional foi utilizado para o cálculo das vazões obtidas com o molinete.

A distância entre uma vertical e outra, depende da largura do rio na seção e da uniformidade da corrente. O espaçamento recomendado, que deve ser reduzido junto às margens, onde a variação das profundidades e das velocidades é mais pronunciada, é dado pela tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Espaçamento entre as verticais da seção de medição.

LARGURA	ESPAÇAMENTO
Até 3 m	0,3 m
3 a 6 m	0,5 m
6 a 15 m	1,0 m
15 a 30 m	2,0 m
30 a 50 m	3,0 m
50 a 80 m	4,0 m
80 a 150 m	6,0 m
150 a 250 m	8,0 m
250 a 400 m	12,0 m

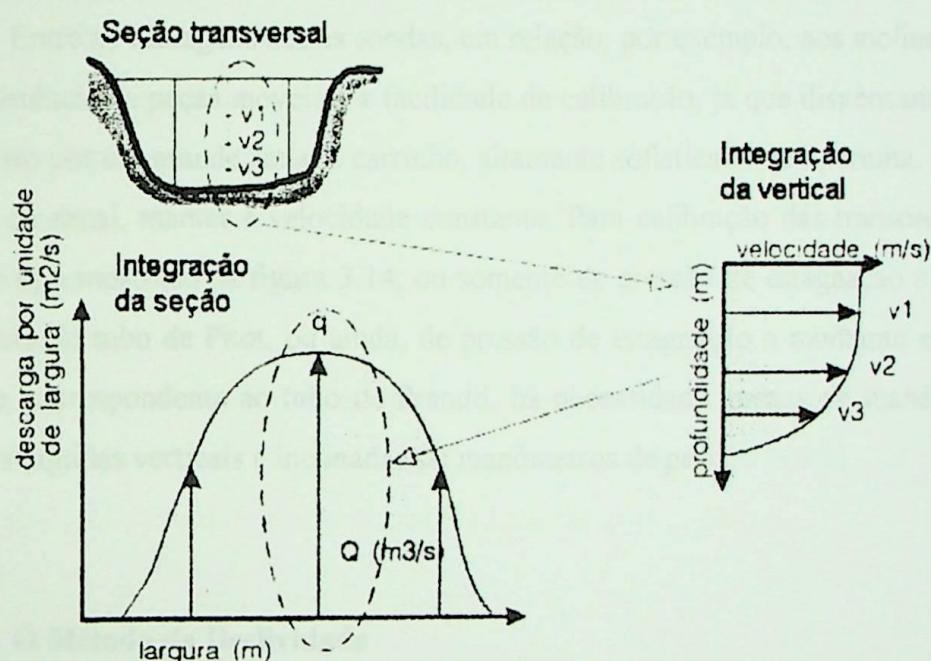


Figura 3.13 - Processo gráfico para cálculo da vazão medida com molinete.

3.3.4 A Transonda

A transonda pode ser utilizada para medição da vazão em canais artificiais e naturais, rios de pequeno e médio porte. Por este método, as velocidades médias são medidas em tubos de corrente dos escoamentos.

Esquematicamente, a figura 3.14 representa um corte longitudinal em uma transonda. Ela possui um transdutor diferencial de pressão, o que permite ampliar a diferença entre as pressões de estagnação de montante, p_{em} , e de jusante, p_{ej} . Este instrumento corresponde à sonda estática Darcy-Cole.

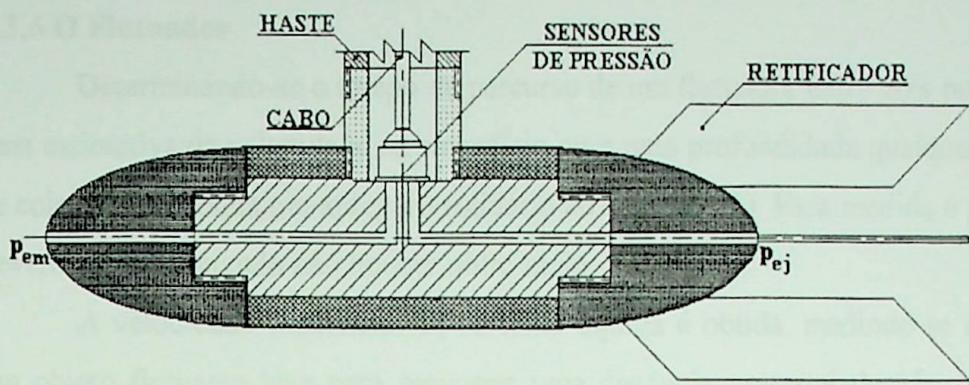


Fig. 3.14 - Corte esquemático longitudinal em uma transonda com transdutor diferencial.

Entre as vantagens destas sondas, em relação, por exemplo, aos molinetes, está a não existência de peças móveis e a facilidade de calibração, já que dispensam o sistema composto por um grande canal e carrinho, altamente sofisticado que permita, em grande trecho do canal, manter a velocidade constante. Para calibração das transondas, sejam elas do tipo mostrado na figura 3.14, ou somente de pressão de estagnação a montante, substituta do tubo de Pitot, ou ainda, de pressão de estagnação a montante e estática a jusante, correspondente ao tubo de Prandtl, há necessidade apenas de manômetros de colunas líquidas verticais e inclinadas ou manômetros de peso.

3.3.5 O Método da Declividade

Este método consiste em calcular-se para um determinado trecho, a declividade

$$- I = \frac{z_2 - z_1}{L} - , \text{ a área média} - A = \frac{A_1 + A_2}{2} \text{ (m}^2\text{)} - , \text{ o perímetro molhado médio} -$$

$$U = \frac{U_1 + U_2}{2} \text{ (m)} - \text{ e o raio hidráulico} - R_H = \frac{A}{U} \text{ (m).}$$

Com estes valores e escolhida a fórmula estatística-experimental em função das características da calha do canal no trecho, pode-se calcular o coeficiente k_c ($\text{m/s}^{0.5}$) da equação geral dos canais e a vazão do escoamento no trecho por:

$$Q = k_c \cdot A \cdot \sqrt{R_H \cdot I} \text{ (m}^3\text{/s)} \quad (3.5)$$

3.3.6 O Flutuador

Determinando-se o tempo de percurso de um flutuador entre dois pontos, tem-se uma estimativa da velocidade na superfície ou a uma profundidade qualquer (desde que se coloque na mesma um anteparo solidário ao dispositivo). Essa medida é precária e só deverá ser feita quando não houver outro meio.

A velocidade superficial da corrente líquida é obtida, medindo-se o tempo que um objeto flutuante leva para percorrer uma distância pré-estabelecida. Utilizando-se um fator de correção, calcula-se a velocidade média do escoamento. Este fator varia de acordo com o material do leito do canal.

Por batimetria, obtém-se a área da seção transversal; multiplicando-a pela velocidade média calculada, tem-se a vazão.

A velocidade média de todo o escoamento é estimada baseando-se na medição da velocidade superficial de apenas uma linha de corrente, geralmente a de maior velocidade. Entretanto, dificilmente, o flutuador se mantém na mesma linha de corrente durante todo o seu trajeto, dificultando a obtenção de uma precisão satisfatória na medição. Por isso, o uso desse método só se justifica em duas situações:

- a) quando se deseja uma estimativa preliminar da vazão;
- b) quando não se consegue utilizar outros métodos; por ocasião de cheias, por exemplo, e para obtenção de pontos altos nas curvas-chave.

3.3.7 Método das Sondas Estáticas

As sondas estáticas têm sido pouco usadas para medições de vazão em canais naturais, principalmente devido a dificuldades nos procedimentos de utilização, destacando-se a da leitura das pressões e/ou de suas diferenças. Elas permitem determinar velocidades em pontos da seção transversal de interesse, cuja área foi previamente determinada, a partir do princípio de conservação da energia aplicado ao tubo de corrente onde a sonda está inserida, logo:

$$v = k_s \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{p_{din} - p_{est}}{\rho}} = k_s \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} \quad (3.6)$$

Onde:

v = velocidade da água (m/s);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

p_{din} = pressão dinâmica (N/m^2);

p_{est} = pressão estática (N/m^2);

ρ = massa específica da água (kg/m^3);

Δh = diferença de pressão estática (m);

k_s = coeficiente da sonda.

O coeficiente da sonda, k_s , deve ser determinado na aferição da sonda, podendo ser tomado igual a um, com expectativa de erro menor que 1% para sondas construídas dentro de recomendações normalizadas.

3.3.7.1 Sondas de Pitot e de Darcy

As sondas conhecidas por tubo de Pitot e tubo de Darcy (figura 3.15), são recomendadas para uso em escoamentos de água em linhas de corrente com velocidade maior que 0,5 (m/s).

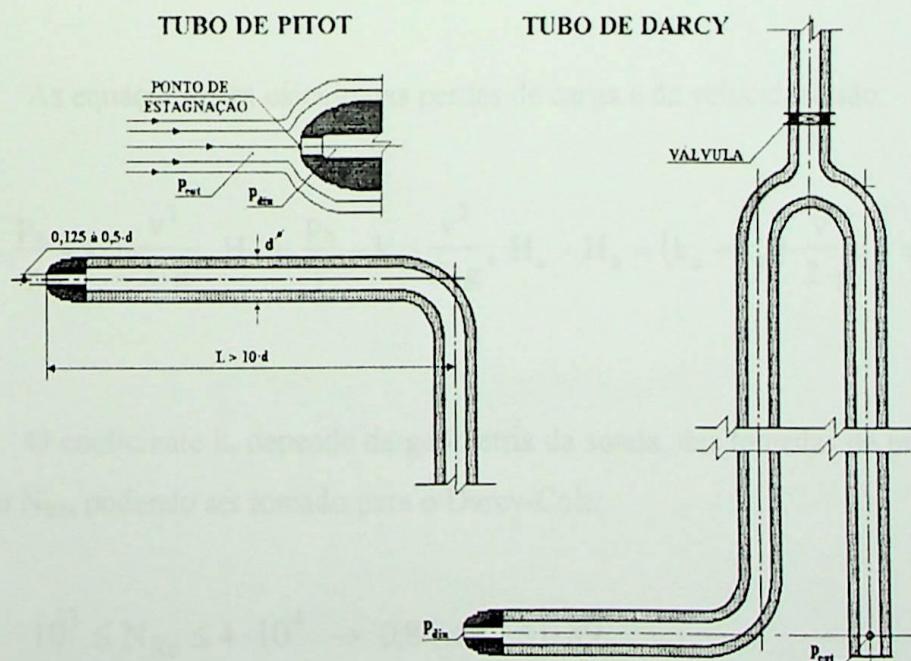


Figura 3.15 - Tubo de Pitot e tubo de Darcy.

A vantagem do tubo de Darcy em relação ao de Pitot está na maior facilidade para leitura do Δh , já que pode ser reduzida a pressão do ar após a válvula, permitindo transportar o Δh para um local onde a leitura pode ser feita com maior facilidade.

3.3.7.2 Sondas de Darcy-Cole e de Recknagel

Com o objetivo de aumentar o Δh , pode-se usar as sondas duplas, mostradas na figura 3.16.

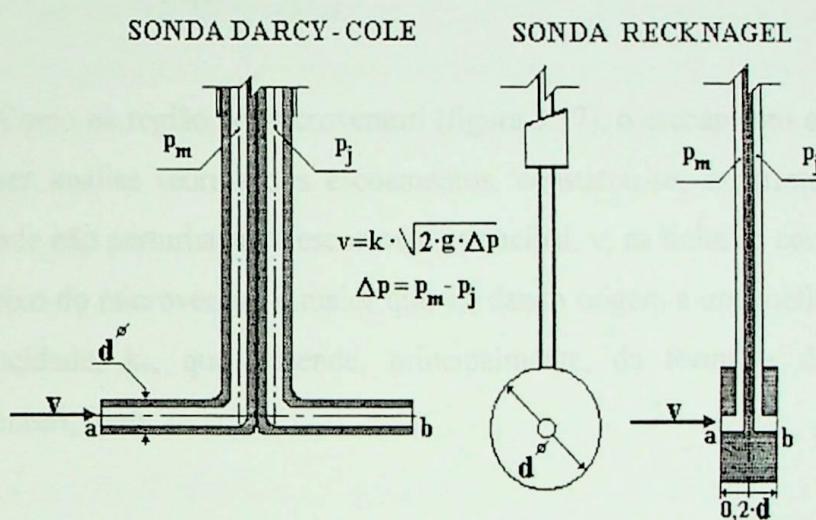


Figura 3.16 - Sondas duplas Darcy-Cole e Recknagel.

As equações para cálculo das perdas de carga e da velocidade são:

$$H_a = \frac{p_a}{\gamma} + k_a \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}; \quad H_b = \frac{p_b}{\gamma} - k_b \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}; \quad H_a - H_b = (k_a + k_b) \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}; \quad v = k_s \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} \quad (3.7)$$

O coeficiente k_s depende da geometria da sonda, das tomadas de pressão em a e b e do N_{Re} , podendo ser tomado para o Darcy-Cole:

$$10^3 \leq N_{Re} \leq 4 \cdot 10^4 \rightarrow 0,84 \leq k_s \leq 0,89 \quad (3.8)$$

3.3.7.3 Sonda Venturi

Esta sonda é um microventuri e serve para amplificar o Δh , mais que as

anteriores, uma vez que,

$$\Delta h = \frac{p_1 - p_2}{\gamma} = \left[\left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 - 1 + \lambda \right] \cdot \frac{v_1^2}{2 \cdot g} \text{ ou } v_1 = \frac{m}{\sqrt{1 - (1 - \lambda) \cdot m^2}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h}, \quad (3.9)$$

sendo: $m = \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^2$ e λ o coeficiente de perda de carga no injetor.

Como na região do microventuri (figura 3.17), o escoamento é dividido em dois, sem fazer análise teórica dos escoamentos, constatou-se, experimentalmente, que a velocidade não perturbada do escoamento principal, v , na linha de corrente que coincide com o eixo do microventuri é maior que v_1 , dando origem a um coeficiente de aumento de velocidade, k_v , que depende, principalmente, da forma e das dimensões do microventuri, logo:

$$v = \frac{k_v \cdot m}{\sqrt{1 - (1 - \lambda) \cdot m^2}} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} = k_s \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} \quad (3.10)$$

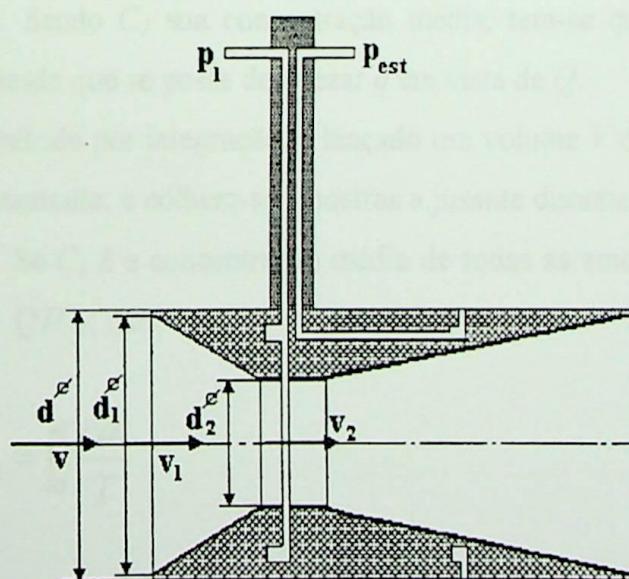


Figura 3.17 - Esquema de microventuri com suas principais características.

Para d_2 entre 50 e 75 (mm), e D entre 350 e 2500 (mm), foram obtidos, experimentalmente, k_s entre 0,34 e 1,35.

3.3.8 O Processo de Diluição

Este processo consiste em se lançar à corrente de água uma substância química ou radioativa, e depois tirar amostras na seção escolhida, que serão dosadas, permitindo o conhecimento da vazão a partir da diluição verificada. O processo de diluição pode ser químico ou radioativo, dependendo da substância empregada como traçadora. As substâncias químicas normalmente empregadas são sais ou corantes, como cloreto de sódio, fluorceina ou bicromato de sódio, e as substâncias radioativas são as de meia-vida curta, ou seja, de decaimento rápido. A titulação é realizada, geralmente, por métodos colorimétricos.

É o processo mais indicado para os rios de montanha que apresentam altas declividades, quedas e corredeiras.

Existem dois métodos para operação desse processo: o método por injeção contínua de solução (figura 3.18) e o método por integração (figura 3.19).

No primeiro, lança-se no rio a montante, durante um certo intervalo de tempo, uma vazão constante q da solução-mãe, cuja concentração é C . Colhem-se na seção de medição, durante um tempo, no máximo, igual àquele em que q não varia, amostras que são dosadas. Sendo C_1 sua concentração média, tem-se que $Q = q \frac{C}{C_1}$ é o valor procurado, desde que se possa desprezar q em vista de Q .

No método por integração, é lançado um volume V de solução, de concentração C , instantaneamente, e colhem-se amostras a jusante durante toda a passagem da nuvem no tempo T . Se C_1 é a concentração média de todas as amostras colhidas no tempo T , tem-se $VC = QTC_1$; mas

$$C_1 = \int_0^T \frac{cdt}{T} \quad (3.11)$$

Onde c é a concentração, variável com o tempo, em cada amostra colhida no intervalo dt . Assim,

$$QTC_1 = QT \int_0^T \frac{cdt}{T} \quad (3.12)$$

$$VC = Q \int_0^T \frac{cdt}{T} \quad (3.13)$$

e

$$Q = \frac{VC}{\int_0^T cdt} \quad (3.14)$$

Para a aplicação dos dois métodos são necessárias algumas condições, como:

- deve haver turbulência ativa em toda a massa de água, de maneira a garantir uma mistura homogênea;
- deve haver ausência de águas paradas para existir a renovação constante das massas em toda a seção considerada.

Embora haja um maior trabalho na dosagem das amostras no método por integração, este é bem mais prático que o outro, por necessitar de menos equipamento e menor quantidade de substância dissolvida.

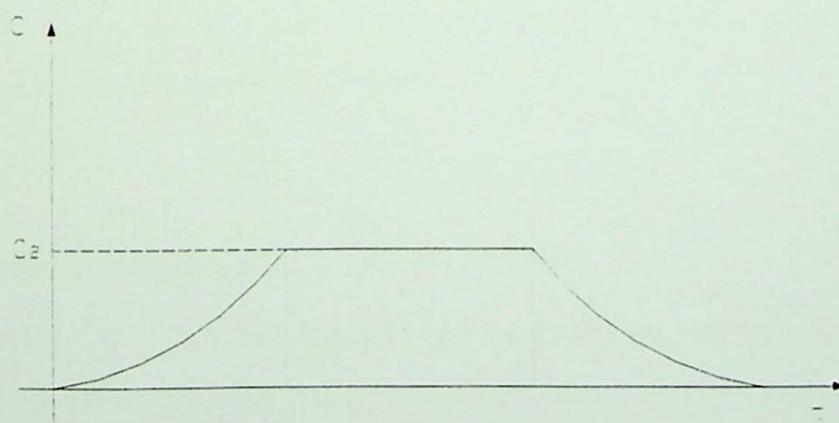


Figura 3.18 - Processo químico de diluição - Método por injeção.

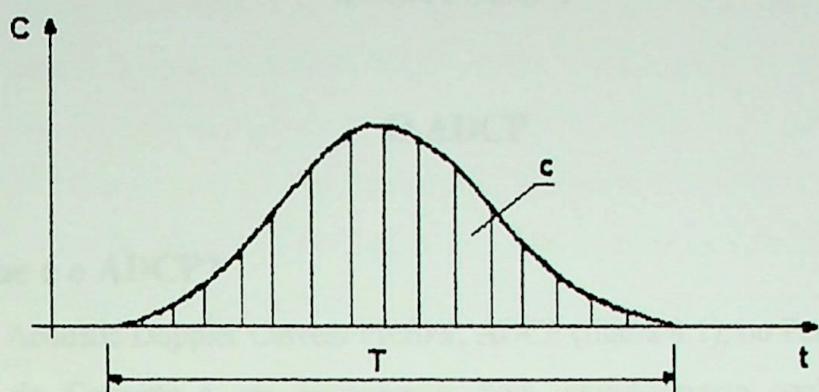


Figura 3.19 - Processo químico de diluição - Método por integração.

CAPÍTULO 4

O ADCP

4.1 O que é o ADCP?

O Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP (figura 4.1), ou Perfilador Doppler-Acústico de Corrente é um instrumento, hoje, mundialmente conhecido no meio hidrológico. Esse instrumento é uma ferramenta que utiliza o efeito Doppler para medir a vazão dos rios, através do somatório de sucessivos perfis de corrente obtidos em tempo real.



Figura 4.1 - O ADCP – Perfilador Doppler-Acústico de Corrente - modelo Workhorse Rio Grande - 1200 kHz (foto do fabricante RD Instruments).

Trata-se de uma ferramenta utilizada para medir correntes marítimas e que, desde da década de 80, vem sendo utilizada com sucesso para medir vazões, especialmente em estuários e em grandes rios.

4.2 Histórico do advento do uso do ADCP

Desde 1967, na tentativa de eliminar os problemas ocorridos em medições com métodos convencionais, empresas como a United States Geological Survey - USGS têm desenvolvido ou encorajado o desenvolvimento de equipamentos projetados para medir vazão de rios com um barco em movimento. Ingerson (1955), Prych et al. (1967), Kallio (1968), Smoot e Novak (1969) e Smith (1971) projetaram sistemas de medição de vazão com barco em movimento, obtendo variados graus de sucesso. Todos estes sistemas,

entretanto, tinham deficiências que limitavam seu uso quando precisão (5% ou mais) e velocidade eram desejadas e quando eram usados em estuários. O maior obstáculo encontrado em todos estes sistemas era que a precisão de cada um dependia da habilidade do piloto do barco e, em menor grau, da tripulação que faria a medição. Os erros na medição de velocidade podiam ser de 20% quando as velocidades do barco excediam 120 cm/s e as velocidades da água eram menores que 30 cm/s (Smith, 1971). Estes sistemas mediam a velocidade em somente um ou dois pontos na coluna d'água e as medições necessitavam de correções para a obtenção de uma velocidade significativa. Segundo Smith (1971), um ou dois pontos na vertical nem sempre definem adequadamente a distribuição vertical de velocidade em estuários.

O precursor do Acoustic Doppler Current Profiler, ou Perfilador Doppler-Acústico de Corrente, ADCP, é o Doppler "speed log", um instrumento que mede a velocidade de barcos através da água ou acima do fundo de mar. O primeiro ADCP comercial, produzido em meados de 1970, era uma adaptação de um "speed log" comercial (Rowe e Young, 1979). O "speed log" foi reprojetado para medir a velocidade da água com maior precisão e permitir medidas em células de profundidade. Assim, de acordo com Rowe e Young (1979), nasceu o primeiro ADCP.

Em 1982, a RD Instruments produziu seu primeiro ADCP. Era um instrumento auto-suficiente, alimentado por uma bateria (Pettigrew, Beardsley e Irish, 1986). Neste ano, um sistema usando um ADCP foi utilizado para medir a vazão do Rio Mississippi em Baton Rouge, Louisiana (Christensen e Herrick, 1982). As vazões medidas com ADCP diferiram menos que 5% de simultâneas medições convencionais, o que foi encorajador. Entretanto, o computador e o programa eram incapazes de converter os dados de velocidade fornecidos pelo perfilador em bases reais de tempo; os valores de vazão tinham que ser processados mais tarde. Embora essa tecnologia parecesse muito promissora na época destes testes, as tecnologias do computador e do processamento dos sinais do Doppler não tinham progredido ao nível necessário para coletar e processar medições confiáveis de vazão em rios e estuários.

Em 1983, a RDI produziu seu primeiro ADCP para ser usado fixado em um barco. Em 1986, a RDI produziu três modelos de ADCP (Self-contained, Vessel-mounted, e Direct-reading) em cinco freqüências diferentes (75, 150, 300, 600 e 1200 kHz).

O processamento do sinal do Doppler evoluiu com os instrumentos através dos anos. A primeira geração de ADCPs usava uma largura de banda estreita, pulso único e método de autocorrelação, que computava o primeiro momento do espectro de freqüência do Doppler. Este método foi o primeiro a produzir medidas de velocidade de água com qualidade suficiente para uso em oceanografia, mas tem sido substituído, desde então, por processamento de sinais com grande largura de banda, por ser um método mais preciso.

Preocupadas com a segurança de suas equipes a USGS e a Sontek, fabricante do ADP e do mini ADP, desenvolveram, separadamente, soluções parecidas. Estas soluções consistem na utilização de um pequeno catamaran com um sistema de transmissão de dados via rádio/modem (figura 4.2), no qual está instalado o instrumento, guiado de uma ponte. Estas soluções foram testadas em correntes com velocidades de até 4 m/s. O mini ADP, que tem diâmetro de apenas 10 cm, mede profundidades de 20 cm e seu tamanho pode ser um ponto importante quando há necessidade de transportá-lo para locais de difícil acesso, por exemplo, regiões montanhosas. Todo o equipamento, inclusive o catamaran, cabe em uma mala de 0,8 x 1,5 m.

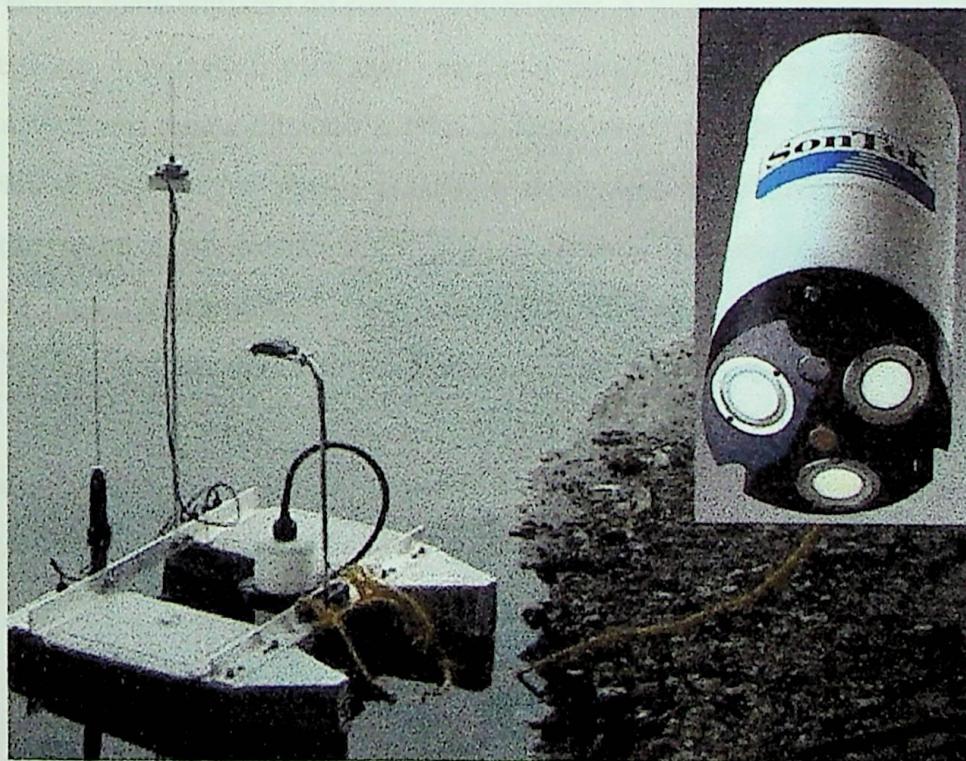


Figura 4.2 - Foto de um mini ADP fixado em um pequeno catamaran com sistema de transmissão de dados via rádio/modem.

No Brasil, segundo Freitas et al. (1999), o marco inicial do uso do ADCP se deu na Bacia Amazônica, em 1994, através da equipe Franco-Brasileira do Projeto Hidrologia da Bacia Amazônica — HiBAm, na época, composta por técnicos do extinto Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica — DNAEE — e o Instituto Francês para a Pesquisa e o Desenvolvimento em Cooperação — ORSTOM.

Os trabalhos do Projeto HiBAm, resultado de doze campanhas de campo com mais de quinhentas medições de vazão realizadas, e de outras instituições (CPRM, ITAIPU, COPEL, SUDERHSA, etc.) que se seguiram àqueles precursores, mostraram a vantagem fundamental desse equipamento para melhorar os conhecimentos sobre a hidrologia e também sobre os fluxos de sedimentos dos grandes rios, tanto da região Amazônica, quanto de outras regiões brasileiras.

4.3 Conceitos Básicos

4.3.1 Efeito Doppler

O efeito Doppler é uma mudança na freqüência do som devido ao movimento relativo entre a fonte emissora do som e o observador. A freqüência do som emitido por um objeto em movimento, para um observador parado, parece aumentar quando o objeto se aproxima dele e diminuir quando o objeto se afasta dele. O efeito Doppler é usado para distinção entre objetos parados e objetos em movimento e para fornecer informação sobre a velocidade destes objetos, através da medição da diferença de freqüência entre o som emitido e o som refletido (figura 4.3).

O efeito Doppler leva em consideração a freqüência do som quando tudo está parado, a velocidade relativa entre a fonte e o receptor das ondas acústicas, e a velocidade do som. Ele depende somente do movimento radial entre a fonte e o receptor, ou seja, do movimento de aproximação ou afastamento entre eles.

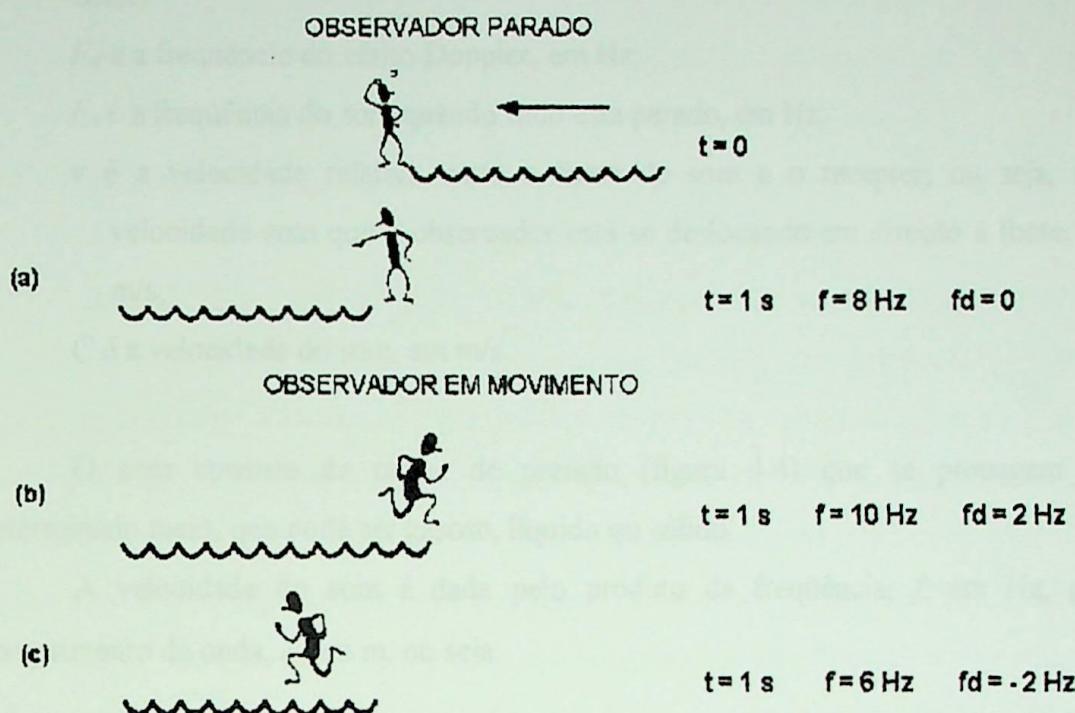


Figura 4.3 - O Efeito Doppler: (a) o observador parado; (b) o observador em movimento na direção da fonte; (c) o observador em movimento na direção contrária da fonte.

Para ilustrar o efeito Doppler tem-se, conforme ilustra a figura (4.3.a), um observador parado que conta oito ondas em um determinado tempo, por exemplo, em 1 segundo, de um fenômeno qualquer, que poderia ser o das ondas do mar incidindo em uma praia. Diante destes dados, diz-se que a freqüência deste fenômeno é de 8 Hz. Se o mesmo observador caminhar na direção das ondas, figura (4.3.b.), ele contará um número maior de ondas, por exemplo, 10 ondas. Neste caso, a freqüência passou a ser 10 Hz. Neste exemplo, a freqüência do efeito Doppler será a diferença entre estas duas freqüências: 2 Hz. É positiva, indicando que o observador está se aproximando da fonte. Se ele tivesse se movido na direção contrária e tivesse contado 6 ondas no mesmo intervalo de tempo, dir-se-ia que a freqüência Doppler seria de -2 Hz, o que indicaria que o observador estaria se distanciando da fonte emissora do fenômeno, figura (4.3.c.).

A freqüência de uma onda varia em função do observador estar parado ou em movimento. À diferença destas duas freqüências dá-se o nome de efeito Doppler, cuja equação, neste caso, é:

$$F_d = F_s (v/C) \quad (4.1)$$

Onde:

F_d é a freqüência do efeito Doppler, em Hz;

F_s é a freqüência do som quando tudo está parado, em Hz;

v é a velocidade relativa entre a fonte de som e o receptor, ou seja, é a velocidade com que o observador está se deslocando em direção à fonte, em m/s;

C é a velocidade do som, em m/s.

O som consiste de ondas de pressão (figura 4.4) que se propagam em determinado meio, que pode ser gasoso, líquido ou sólido.

A velocidade do som é dada pelo produto da freqüência, f , em Hz, pelo comprimento da onda, λ , em m, ou seja:

$$C = f \cdot \lambda \quad (4.2)$$

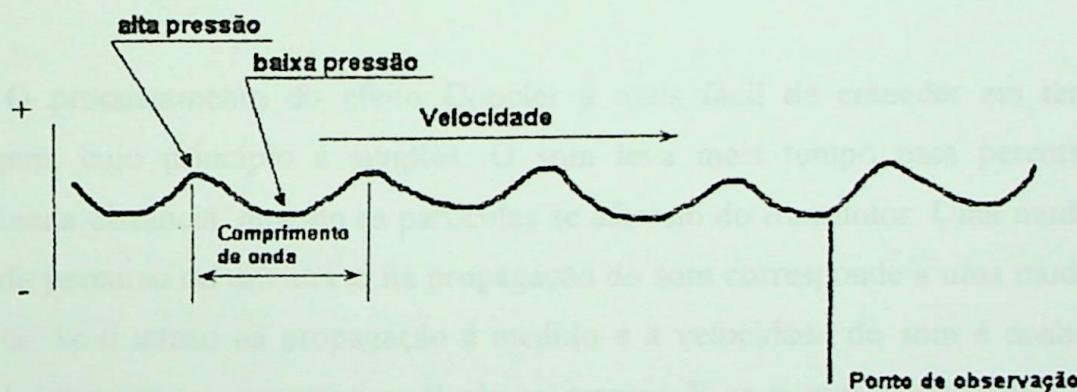


Figura 4.4 - Velocidade do som.

À velocidade com que o som se propaga em um determinado meio dá-se o nome de celeridade e, normalmente, é representada pela letra “C”. Na água, em um meio infinito, a celeridade é dada por:

$$C = k / \rho \quad (4.3)$$

Onde:

k é o módulo de elasticidade volumétrica do meio, que, no caso da água, é igual a $2,2 \cdot 10^9$ (N/m²);

ρ é a massa específica, que, para a água a 20° C, é igual a 998,2 (kg/m³).

O ADCP usa o efeito Doppler através da transmissão do som a uma determinada freqüência e da recepção desse som, refletido por partículas em suspensão na água. A maior parte do som transmitido passa pelas partículas sem ser refletido, mas a pequena parte que é refletida, causa o efeito Doppler. Quando as partículas se afastam do ADCP, o som que elas ouvem é alterado pelo efeito Doppler para uma freqüência mais baixa, proporcional à velocidade relativa entre elas e o instrumento. Para o ADCP, é como se as partículas fossem a fonte do som; ele ouve o som refletido alterado, novamente, pelo efeito Doppler. Portanto, como o ADCP transmite e recebe o som, o efeito Doppler é dobrado, e sua equação modificada para:

$$F_d = 2 \cdot F_s (v/C) \quad (4.4)$$

O processamento do efeito Doppler é mais fácil de entender em termos de defasagem, cujo princípio é simples. O som leva mais tempo para percorrer uma determinada distância, quando as partículas se afastam do transdutor. Uma mudança no tempo de percurso ou um atraso na propagação do som corresponde a uma mudança na distância. Se o atraso na propagação é medido e a velocidade do som é conhecida, é possível determinar o quanto a partícula se moveu. E se o espaço de tempo entre os pulsos acústicos é conhecido, é possível calcular a velocidade da partícula.

Uma maneira precisa de medir o atraso na propagação do som é a utilização da fase. Ela é usada para determinar a defasagem. Para entender como isso é feito basta considerar os ponteiros de um relógio. Uma volta do ponteiro corresponde a 360° de fase, da mesma forma que um ciclo completo de um sinal senoidal. Conseqüentemente, as diferenças de fase entre o primeiro e o segundo ecos da figura 4.5, são, respectivamente, (A) 0°, (B) 40° e (C) 400°. As diferenças de fase são exatamente proporcionais aos deslocamentos da partícula. O problema com a medição da fase é que ela só pode ser medida em ciclos de 360°. Uma vez que ela ultrapassa os 360°, o ciclo é iniciado novamente em 0°. Considerando-se a medição de fase em um circuito

eletrônico, fases de 40° e 400° ($400^\circ = 360^\circ + 40^\circ$) são as mesmas. Isto é a ambigüidade de velocidade. Então, para a obtenção de medições de velocidade precisas, é necessário que as medições de fase sejam sensíveis às mudanças na velocidade, da mesma forma que o ponteiro de minutos é sensível à mudança de hora. Uma maneira de resolver o problema é manter o espaço de tempo entre os pulsos, tão pequeno, que a partícula nunca tenha tempo suficiente para se mover para muito longe.

Defasagem

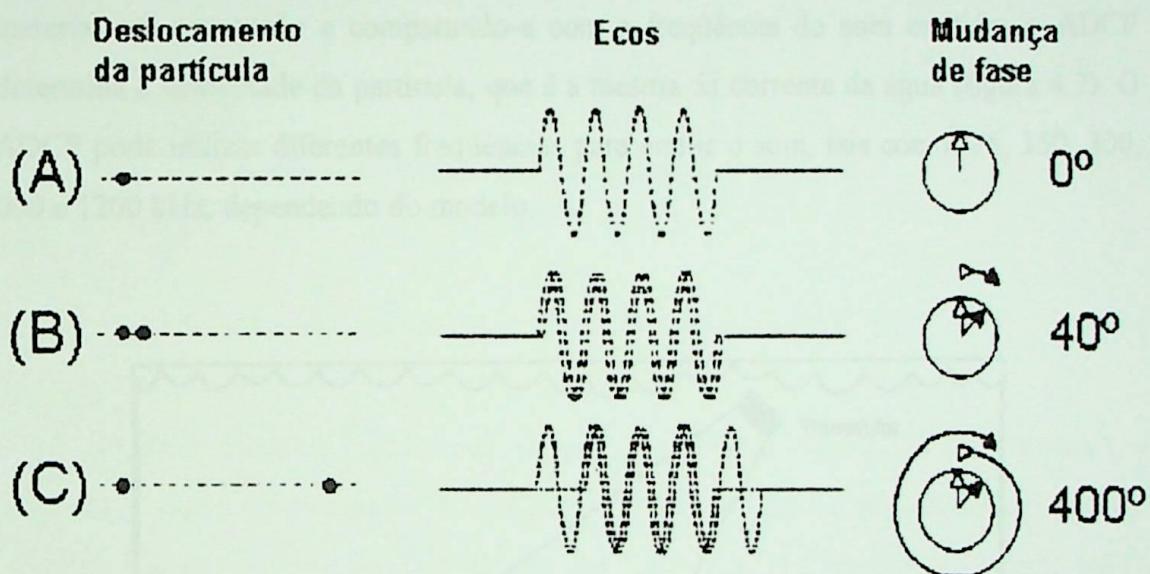


Figura 4.5 - Atraso na propagação do som e mudança de fase, causados pelo deslocamento da partícula.

4.4 Princípio de funcionamento do ADCP

4.4.1. Principais características do ADCP

O ADCP possui algumas características bastante úteis, pois mede seu deslocamento e altura em relação ao fundo do rio e dá um perfil de intensidade do eco do som refletido pelo material em suspensão água. Essa última característica, necessária à medição das velocidades das correntes da água, também possibilita conhecer a distribuição dos sedimentos em suspensão na seção.

O instrumento transmite pulsos acústicos na coluna d'água (figura 4.6). As

partículas de sedimentos, transportadas pela corrente de água, refletem o som de volta para o instrumento que percebe o eco através de sensores, fazendo com que ele reconheça as diferentes profundidades e as velocidades das respectivas linhas de corrente através do efeito Doppler.

O efeito Doppler refere-se à mudança de freqüência do sinal transmitido pelo sonar, causada pelo movimento relativo entre o aparelho e o material em suspensão na água, sob a ação do feixe de ondas sonoras. Como o material em suspensão se desloca na mesma velocidade da corrente de água, a magnitude do efeito Doppler é diretamente proporcional a essa velocidade. Medindo-se a freqüência dos ecos que retornam do material em suspensão e comparando-a com a freqüência do som emitido, o ADCP determina a velocidade da partícula, que é a mesma da corrente da água (figura 4.7). O ADCP pode utilizar diferentes freqüências para emitir o som, tais como: 75, 150, 300, 600 e 1200 kHz, dependendo do modelo.

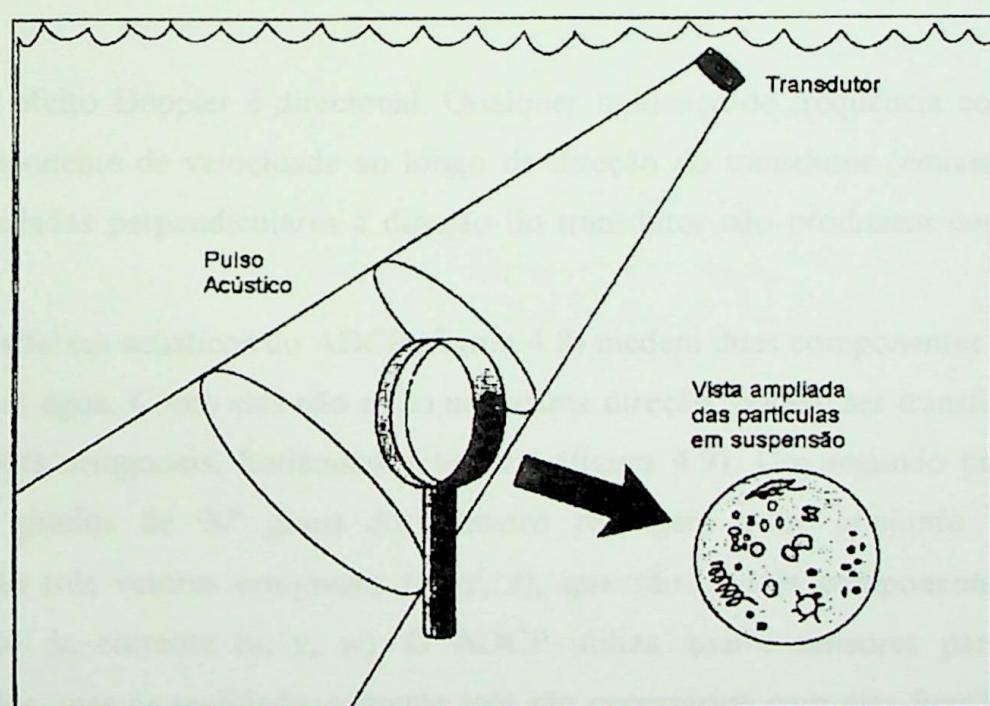


Figura 4.6 - Princípio de funcionamento.

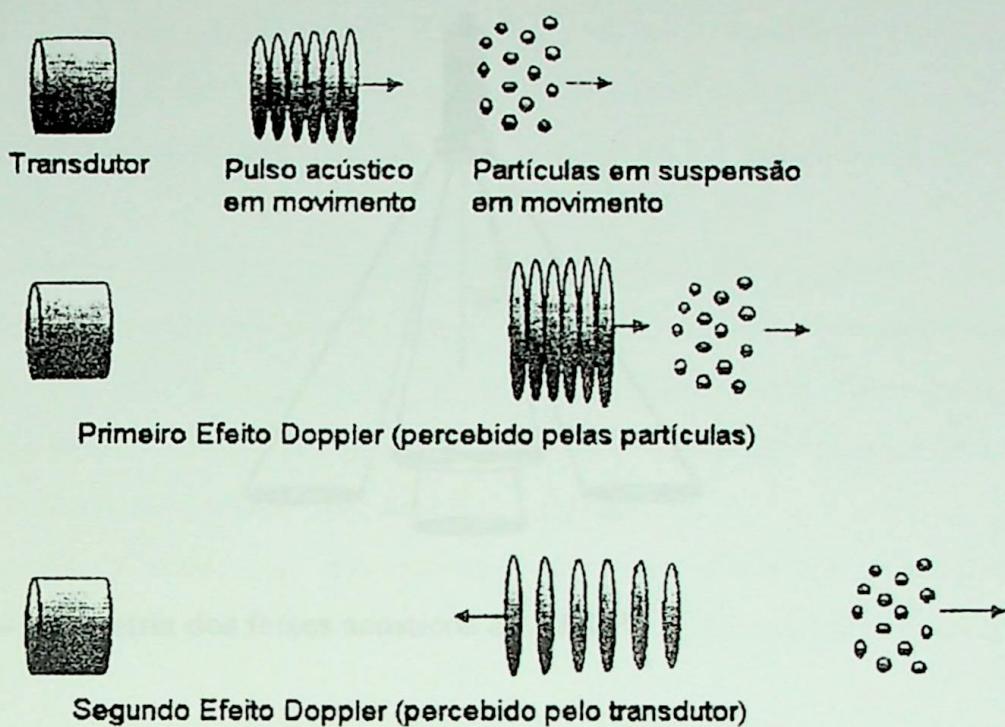


Figura 4.7 - Mudança na freqüência causada pelo efeito Doppler.

O efeito Doppler é direcional. Qualquer mudança de freqüência corresponde a uma componente de velocidade ao longo da direção do transdutor (emissor/receptor). As velocidades perpendiculares à direção do transdutor não produzem nenhum efeito Doppler.

Os feixes acústicos do ADCP (figura 4.8) medem duas componentes do vetor da corrente de água. Como elas não estão na mesma direção, podem ser transformadas em dois vetores ortogonais, horizontal e vertical (figura 4.9). Um segundo par de feixes sonoros, girados de 90° graus do primeiro par, gera outro conjunto de vetores, totalizando três vetores ortogonais (x, y, z), que são os três componentes do vetor velocidade da corrente (u, v, w). O ADCP utiliza quatro sensores para medir as velocidades, mas na realidade, somente três são necessários para esta função; o quarto sensor tem a função de confirmar as velocidades medidas pelos outros três. O ADP, da Sontek, utiliza apenas três sensores e desempenha funções semelhantes às do ADCP.

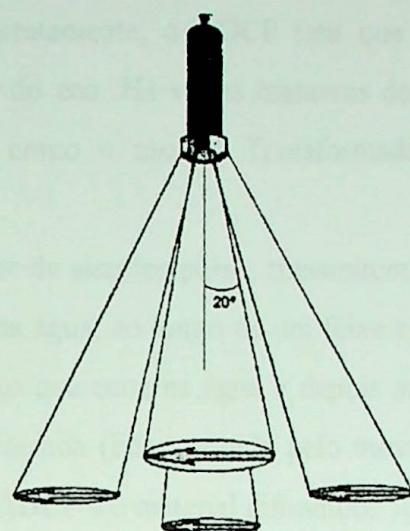


Figura 4.8 - Geometria dos feixes acústicos do ADCP.

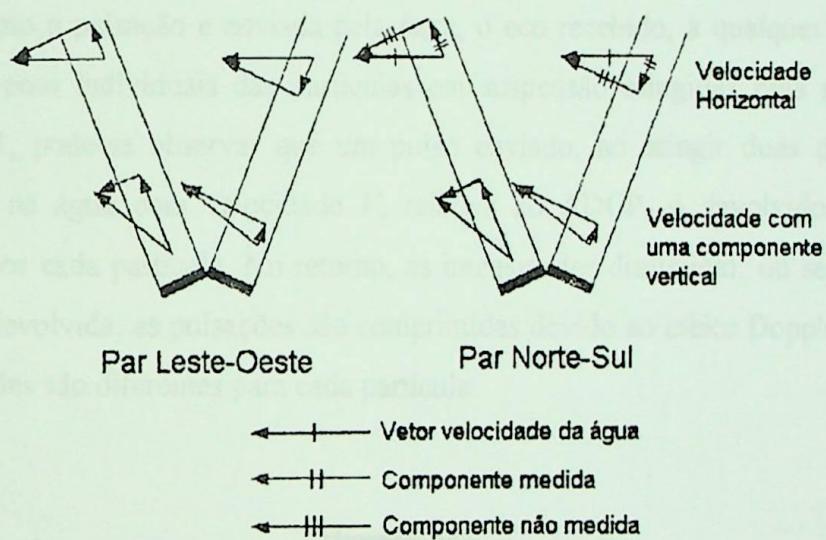


Figura 4.9 - Componentes de velocidade da água.

O ADCP também é capaz de levantar o perfil de velocidades da água ao longo da seção. Isto é feito por canais que analisam os sinais de retorno.

As funções de emissor e de receptor dos transdutores são intercambiadas de tempos em tempos, a intervalos regulares, de acordo com os tempos de retorno dos ecos na água. Este processo de distribuição dos registros dos ecos refere-se às seções distintas da coluna de água, conhecidas como células de profundidade (figura 4.10). Assim, a distribuição das componentes das velocidades medidas para diferentes células de profundidade gera o perfil de velocidades.

Para funcionar corretamente, o ADCP tem que determinar com precisão os ganhos do efeito Doppler do eco. Há várias maneiras de processar um sinal para esta mudança de freqüência, como o uso de Transformadas Rápidas de Fourier e da Autocovariância.

Os sonares Doppler de simples pulso, transmitem um pequeno pulso de som a uma freqüência fixa (F_t) na água, ao longo de um feixe acústico estreito. Estes sonares recebem primeiro o reflexo que ecoa na água e depois no fundo. Esses ecos têm uma freqüência Doppler diferenciada (F_d), causada pelo movimento relativo entre o sonar (transmissor/receptor) do ADCP e o material difundido.

Os ecos refletidos têm um espectro de largura de banda diferente de zero, centrado em F_d . A razão dominante para a largura de banda é o comprimento do pulso transmitido.

Como a pulsação é enviada pela água, o eco recebido, a qualquer instante, é a soma dos ecos individuais das partículas em suspensão atingidas pela pulsação. Na figura 4.11, pode-se observar que um pulso enviado, ao atingir duas partículas em suspensão na água com velocidade V , relativa ao ADCP, é devolvido de maneira diferente por cada partícula. No retorno, as intensidades diminuem, ou seja, nem toda energia é devolvida; as pulsações são comprimidas devido ao efeito Doppler; e as fases das pulsações são diferentes para cada partícula.

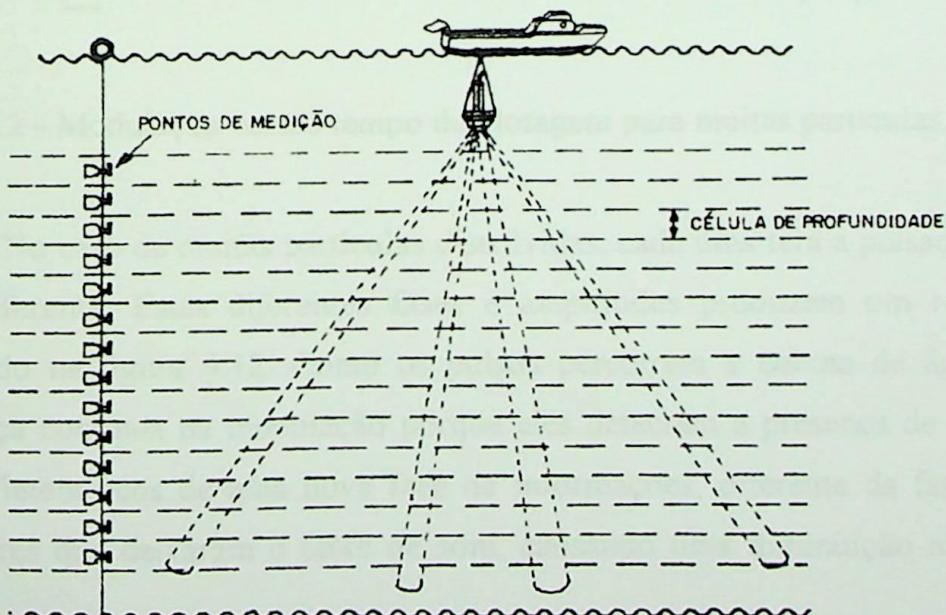


Figura 4.10 - Exemplo típico de medição com ADCP.

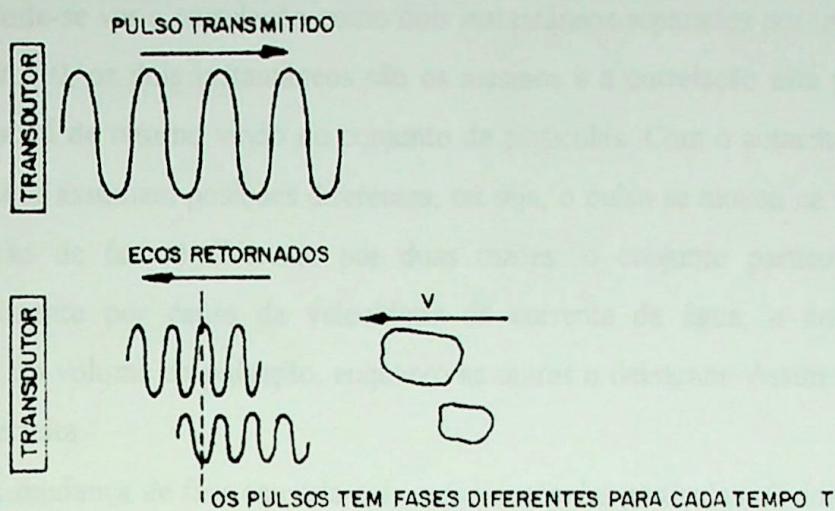


Fig. 4.11 - Eco retornado de duas partículas em suspensão.

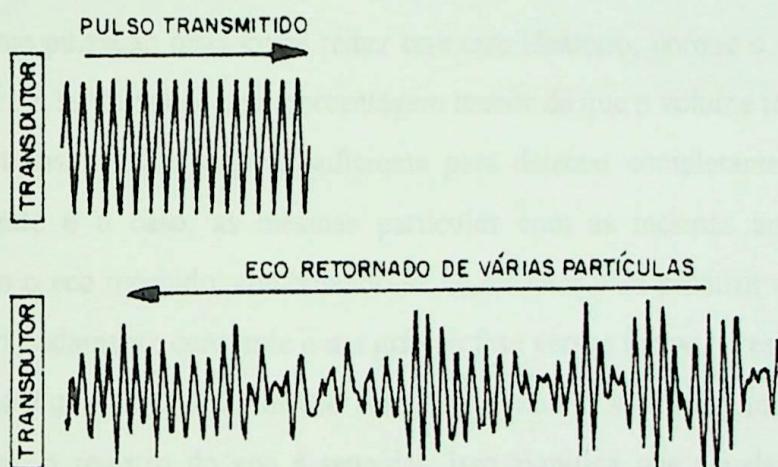


Fig. 4.12 - Modulação versus tempo de plotagem para muitas partículas.

No caso de muitas partículas dissolvidas, cada uma terá a pulsação refletida com fase diferente. Estas diferentes fases e amplitudes produzem um registro, como é mostrado na figura 4.12. Como os pulsos percorrem a coluna de água, ocorre uma mudança contínua na modulação porque eles detectam a presença de novas partículas que refletem ecos de uma nova fase de informações, diferente da fase das partículas anteriores que deixaram o feixe de som, causando uma diminuição na correlação dos sinais.

A correlação é a comparação do sinal de retorno de uma pulsação com ela mesma. Isso permite deduzir a freqüência da pulsação de retorno.

Pode-se ver a correlação como dois instantâneos separados por um tempo t . No instante $t = 0$, os dois instantâneos são os mesmos e a correlação está perfeita, assim como o sinal de retorno vindo do conjunto de partículas. Com o aumento de t , os dois instantâneos assumem posições diferentes, ou seja, o pulso se moveu na água. Então, a informação de fase é diferente por duas razões: o conjunto partículas se moveu completamente por causa da velocidade da corrente da água, e novas partículas entraram no volume da pulsação, enquanto as outras o deixaram. Assim a correlação é menos perfeita.

A mudança de fase causada pelo movimento das partículas, dividida pelo tempo entre os dois instantâneos, fornece a freqüência do efeito Doppler. As causas dessa mudança de fase são: a obtenção de mais informação e as incertezas na estimativa das freqüências, produzidas pela componente de ruído dos sinais, que são associadas com cada medida de velocidade.

Uma pulsação mais longa reduz este erro aleatório, porque o volume das novas partículas em suspensão é uma porcentagem menor do que o volume total de pulso. Se a pulsação transmitida é longa o suficiente para detectar completamente o fundo, que normalmente é o caso, as mesmas partículas com as mesmas amplitudes e fases dominarão o eco recebido, combinando-se no receptor para produzir uma amplitude de eco aproximadamente constante e um gráfico fase versus tempo. É essa reflexão com o espelho do fundo que gera um eco semelhante para o sinal de retorno das partículas dissolvidas; o registro do eco é senoidal. Isso significa que aquelas estimativas das velocidades de fundo são mais precisas que as da água. A redução em erro aleatório é proporcional à raiz quadrada do número destas medidas independentes.

4.4.2. O sistema ADCP

O sistema ADCP consiste de transdutores, sensores e equipamento de processamento de dados que, interconetados, formam um sistema integrado (fig. 4.13).

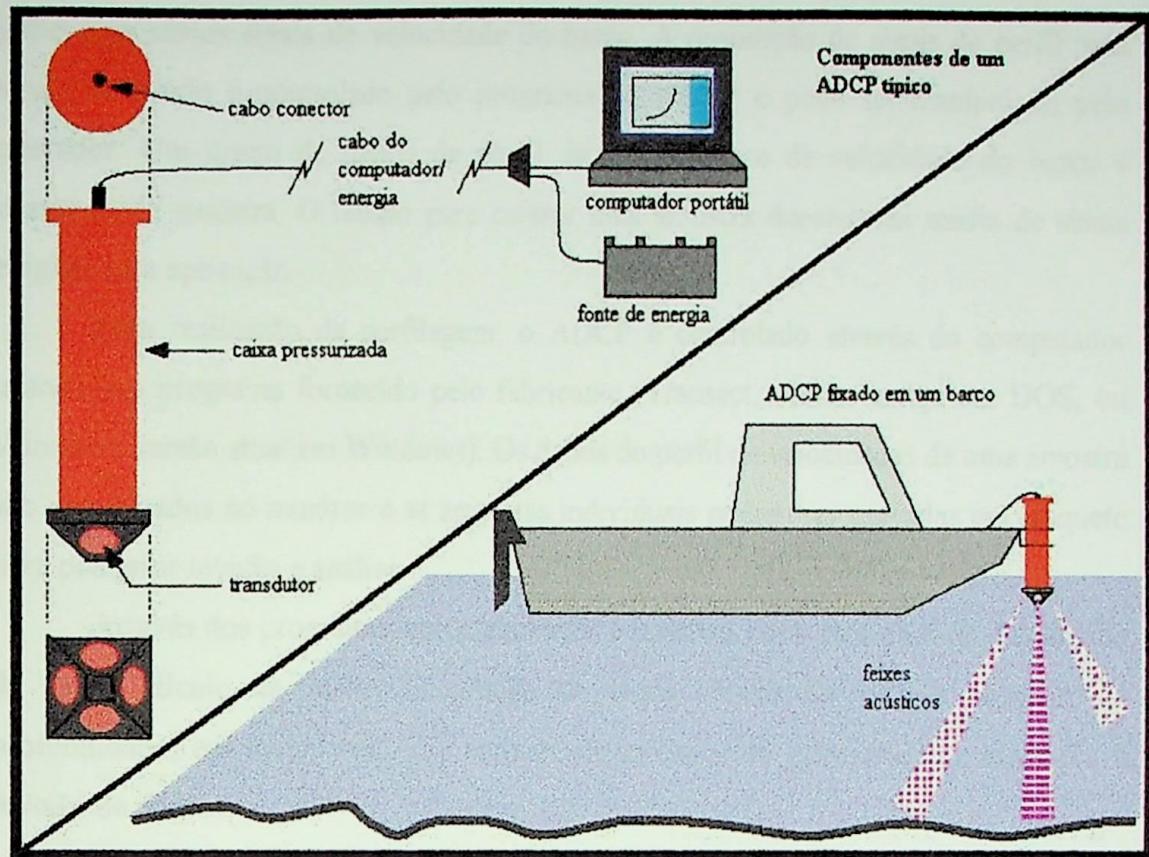


Figura 4.13 - Componentes do sistema ADCP.

Estes componentes consistem do seguinte:

- 1) Um transdutor com 22,9 cm de diâmetro, que inclui quatro elementos transdutores acústicos, amplificadores transmissor/receptor e um sensor de temperatura. Os dados do termostato são usados pelo ADCP para calcular a velocidade do som na água;
- 2) Uma unidade eletrônica para aquisição de dados e processamento de sinais eletrônicos para o transdutor, a bússola e os sensor de profundidade. Esta unidade eletrônica também contém interfaces eletrônicas serial e paralela para comunicação externa do equipamento;
- 3) Um sistema computadorizado de aquisição de dados.

O ADCP pode realizar transmissão e aquisição de dados acústicos e pode calcular a velocidade da água para cada intervalo de profundidade, para uma taxa de mais de 10 medições de perfil (sinais) por segundo. Para a maioria das aplicações de perfilagem, é calculada a média de 8 a 10 sinais para cada intervalo e são registrados

junto com vários sinais de velocidade do barco. A proporção de sinais de perfil para sinais de fundo é controlada pelo programa do ADCP e pode ser manipulado pelo operador. Um grupo de dados de perfil de velocidade e de velocidade do barco é chamado de amostra. O tempo para coletar uma amostra depende da média de sinais exigida pela aplicação.

Para realização da perfilagem, o ADCP é controlado através do computador usando um programa fornecido pelo fabricante (Transect, versão antiga em DOS, ou Winriver, versão atual em Windows). Os dados do perfil de velocidades de uma amostra são visualizados no monitor e as amostras individuais podem ser gravadas em disquete para posterior revisão e análise.

Através dos programas computacionais é possível obter medições de velocidade da água, cálculo da vazão, integração de dados obtidos de GPS e sensores de profundidade, em tempo real. Ele consiste de módulos de planejamento, aquisição e revisão de dados.

4.4.3 Modos de operação do ADCP.

No ADCP Workhorse Rio Grande - 1200 kHz, cujas características estão descritas no anexo I, existem três modos de operação a serem selecionados pelo usuário de acordo com as condições da seção a ser medida: 1, 5 e 8.

O **modo 1** é adequado para maiores profundidades, entre 3,5 e 20 m, e velocidade relativa entre 1 e 10 m/s. É um modo geral de operação que abrange uma larga faixa de utilização.

Os **modos 5 e 8** fornecem medições mais precisas, mas operam numa faixa menor de utilização. O desvio-padrão para estes modos é muito baixo porque há um espaço de tempo relativamente longo entre dois pulsos.

A tabela III.1, do anexo III, apresenta as especificações de cada modo de operação. As extensões que constam nesta tabela são medidas da face do transdutor. A profundidade do transdutor deve ser adicionada para determinar as reais mínima e máxima profundidades de perfilagem. A extensão máxima depende da temperatura da água e do tamanho da célula utilizada. O desvio-padrão dos modos 5 e 8 varia com as velocidades da água e do barco, a forma e a rugosidade do leito, a profundidade do canal e a turbulência.

4.4.4. Limitações operacionais.

O ADCP está sujeito a limitações operacionais que influenciam diretamente a qualidade das medições. Uma destas limitações é a incapacidade de coletar dados da área total da seção de medição. Na medição com ADCP, a seção é dividida em cinco subseções: superior, medida, inferior, esquerda e direita (figura 4.14).

Áreas não medidas pelo ADCP

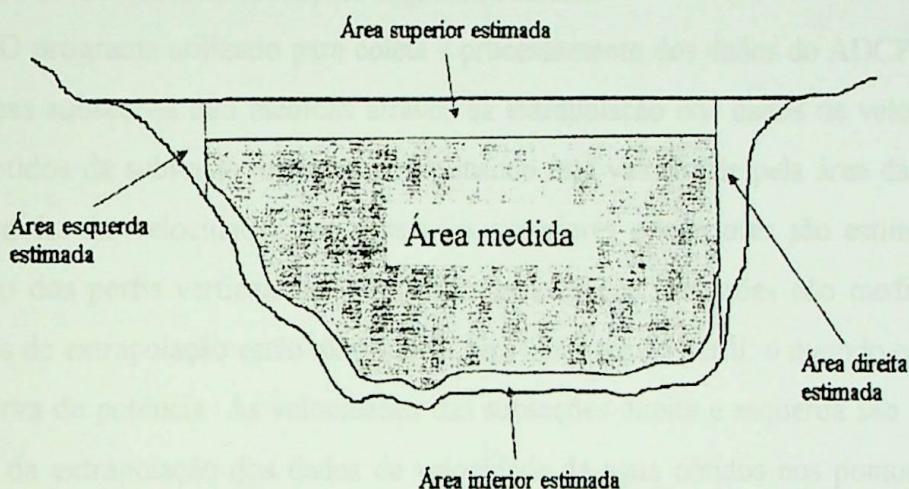


Figura 4.14 - Área da seção de medição, dividida em subseções.

A incapacidade do ADCP de coletar dados da subseção superior deve-se a três fatores: distância da superfície da água aos transdutores (parte submersa do instrumento), camada cega e distância entre sucessivos pulsos acústicos emitidos. Os transdutores devem estar totalmente submersos durante a medição, sendo que o ADCP não mede na camada de água acima dos transdutores. A camada cega é a parte imediatamente abaixo dos transdutores, na qual os ecos não podem ser recebidos pelos transdutores por causa das suas propriedades físicas. A soma destes três fatores é a extensão da parte superior da coluna d'água que não pode ser medida pelo ADCP.

As velocidades da água também não podem ser medidas na subseção inferior por causa da interferência dos feixes de onda laterais. Esta interferência acontece quando o fundo do rio é atingido pela energia acústica dos feixes de onda laterais de cada um dos quatro sensores. As reflexões desta energia, originadas no fundo do rio são fortes e dominam os ecos das partículas em suspensão próximas ao fundo. A espessura da

subseção inferior é de, aproximadamente, 6% da distância do fundo do rio ao ADCP para transdutores com ângulos de 20°.

Outras subseções não medidas pelo ADCP são as localizadas próximas às margens. Muitas vezes, estas áreas apresentam profundidades pequenas demais para serem medidas. No caso de um canal com uma margem vertical, os sinais do ADCP que atingirem a margem, retornarão um falso eco de fundo, induzindo à estimativa de uma profundidade menor que a real. Quando o instrumento começa a subestimar a profundidade real, a coleta de dados deve ser finalizada, deixando-se de medir as áreas próximas às margens, ou subseções esquerda e direita.

O programa utilizado para coleta e processamento dos dados do ADCP, estima a vazão nas subseções não medidas através da extrapolação dos dados de velocidade da água obtidos da subseção medida, multiplicando esta velocidade pela área da subseção não medida. As velocidades das subseções superiores e inferiores são estimadas pela extensão dos perfis verticais de velocidades através das subseções não medidas. Dois métodos de extrapolação estão disponíveis para extensão do perfil: o método constante e o da curva de potência. As velocidades das subseções direita e esquerda são estimadas através da extrapolação dos dados de velocidade da água obtidos nos pontos inicial e final da travessia. Por isso, é imprescindível que nestes pontos, o instrumento seja capaz de medir a velocidade em pelo menos duas células de profundidade.

Outras limitações operacionais que também podem afetar a precisão da medição são: a velocidade do barco, ou seja, quando esta ultrapassa a máxima velocidade da água, a precisão diminui; e as oscilações do instrumento, causadas por ondas na superfície da água.

4.4.5. Algoritmo para processamento de vazão

Segundo Simpson e Oltmann (1993) um algoritmo para processamento de vazão no ADCP, a partir do perfil de velocidade da água e dados de trajetória de fundo, foi desenvolvido por K.L. Deines para testes no Rio Mississippi, em 1982. Uma vantagem deste algoritmo de medição é que não há necessidade de que o barco percorra uma trajetória em linha reta. Ele pode atravessar um rio ao longo de qualquer trajetória arbitrária e ainda coletar uma medição precisa de vazão.

A equação geral para determinação de vazão do rio através de uma superfície arbitrária é:

$$Q_t = \int_s \overline{V_f} \cdot \overline{n} ds \quad (4.5)$$

Onde: Q_t = descarga total do rio;

$\overline{V_f}$ = vetor velocidade média da água;

\overline{n} = vetor unitário normal a ds para um ponto genérico;

ds = diferencial de área.

Para medições com barco em movimento, a área s é definida pela superfície vertical sob a trajetória percorrida pelo barco. O produto de $\overline{V_f} \cdot \overline{n}$ será igual a zero quando o barco estiver se movendo contra ou a favor da corrente e será igual a $|\overline{V_f}|$ quando o barco estiver se movendo perpendicularmente à corrente (ambos os vetores estão no plano horizontal).

Como o ADCP fornece dados de velocidade do barco e da água no sistema de coordenadas do barco, é conveniente reformular a equação 1 (de Christensen e Herrick, 1982):

$$Q_t = \int_0^T \int_0^d (\overline{V_f} \times \overline{V_b}) \cdot \overline{k} dz dt \quad (4.6)$$

Onde: T = tempo total da travessia da seção;

d = profundidade total;

$\overline{V_b}$ = vetor velocidade média do barco;

\overline{k} = vetor unitário na direção vertical;

dz = diferencial vertical de profundidade;

dt = diferencial de tempo.

Convertendo $(\overline{V_f} \times \overline{V_b}) \cdot \overline{k}$ em coordenadas retangulares, tem-se:

$$\overline{V_f} = a_1 \overline{i} + a_2 \overline{j}; \quad \overline{V_b} = b_1 \overline{i} + b_2 \overline{j};$$

E, então,

$$(\overline{V_f} \times \overline{V_b}) \cdot \overline{k} = a_1 b_2 - a_2 b_1, \quad (4.7)$$

Onde: a_1 = componente do vetor velocidade média da água na direção i ;

a_2 = componente do vetor velocidade média da água na direção j ;

b_1 = componente do vetor velocidade média do barco na direção i;

b_2 = componente do vetor velocidade média do barco na direção j;

i = vetor unitário na direção i; e

j = vetor unitário na direção j.

Assume-se $f = a_1 b_2 - a_2 b_1$.

O ADCP fornece dados de velocidade em coordenadas relativas ao barco e a terra. O sistema de coordenadas também pode ser usado para processar a vazão enquanto as velocidades da água e do barco são descritas no mesmo sistema. Na prática, a integral da vazão é aproximadamente a soma de muitas seções de medição. A equação fica com a forma:

$$Q_m = \sum_{i=1}^{N_s} \left[\int_0^{d_i} f_i dz \right] t_i \quad (4.8)$$

Onde: Q_m = vazão medida no canal;

N_s = número de subseções de medição;

i = índice para a subseção;

d_i = profundidade da subseção;

f_i = valor de f integrado para a subseção i ,

dz = diferencial vertical de profundidade da subseção i ;

t_i = tempo decorrido entre os finais das subseções i e $i - 1$.

4.4.6 Fórmulas e cálculos

Com os dados medidos pelo ADCP, o programa calcula a vazão. Nas partes não medidas da seção, a vazão é estimada (figura 4.14). Estes valores são acumulados durante toda a medição. A vazão total é a soma da vazão nas partes superior, medida e inferior. O programa também pode estimar a vazão próxima das margens e incluí-la na vazão total, no menu “Playback”.

4.4.6.1 Cálculo da vazão

A vazão é o volume total de água que passa por uma determinada seção por unidade de tempo. O programa calcula a vazão total para cada amostra do ADCP e

exibe a estimativa nos modos “Acquire” e “Playback”. O ADCP mede perfis de velocidade da água com relação ao barco, a velocidade do barco com relação ao fundo do rio e a profundidade até o fundo para cada sensor do ADCP. O cálculo da vazão depende somente destes dados. Não é necessário saber a posição na bússola ou a localização do barco. Além disso, a trajetória do barco durante a medição pode ser uma curva arbitrária (figura 4.15).

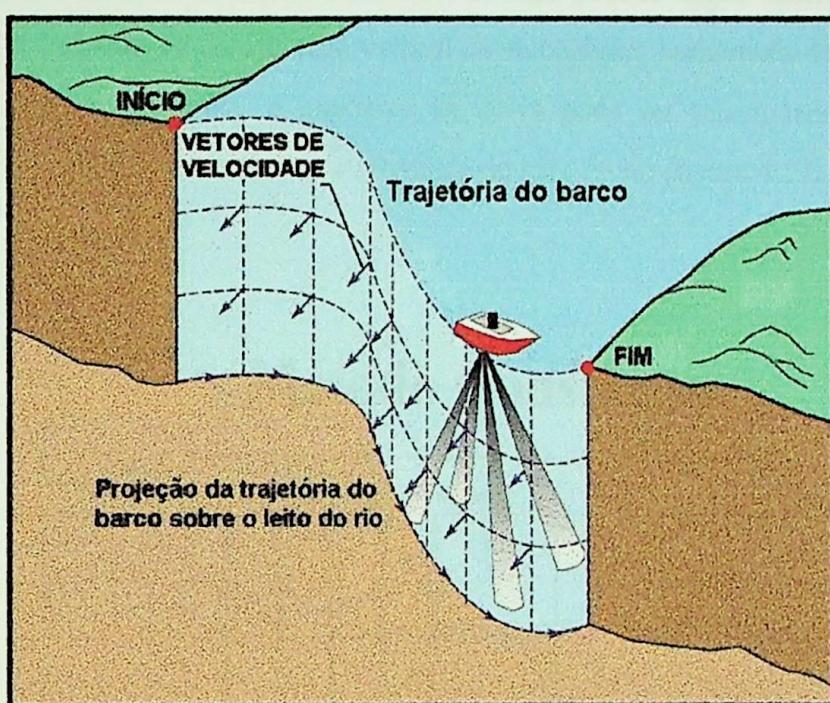


Figura 4.15 - Trajetória do barco durante a medição.

4.4.7 Estimativa da vazão nas partes não-medidas da seção transversal

Conforme a descrição no item 4.4.4, devido às propriedades físicas do ADCP, aos dispositivos de instalação e às características da seção, algumas áreas da mesma não são medidas pelo ADCP. Para solucionar esta limitação, o programa estima estas áreas através de extrapolação do conjunto dos perfis de velocidades obtidos na área de alcance do instrumento, conforme descrito a seguir.

4.4.7.1 Estimativa da vazão nas áreas não-medidas do perfil de velocidades

Estas áreas correspondem à parte superior e à parte inferior da seção. Existem dois métodos disponíveis no programa Transect para a estimativa da vazão nestas áreas, baseados na configuração das partes superior e inferior. Os dois métodos são:

- a) **Método Constante:** Este é o método mais simples de estimativa da vazão nas partes não medidas do perfil. Contudo, este método não segue descrições hidráulicas aceitas da distribuição vertical de velocidades horizontais da água em canais abertos, particularmente na parte inferior do perfil, próxima ao fundo do canal, onde a velocidade decresce para zero (figura 4.16).

 - b) **Método da Curva de Potência:** Este método segue descrições hidráulicas aceitas da distribuição vertical de velocidades horizontais da água em canais abertos. Nele, o expoente da curva pode ser selecionado com base nas condições de fluxo e rugosidade do leito do rio (figura 4.17).

Método Constante

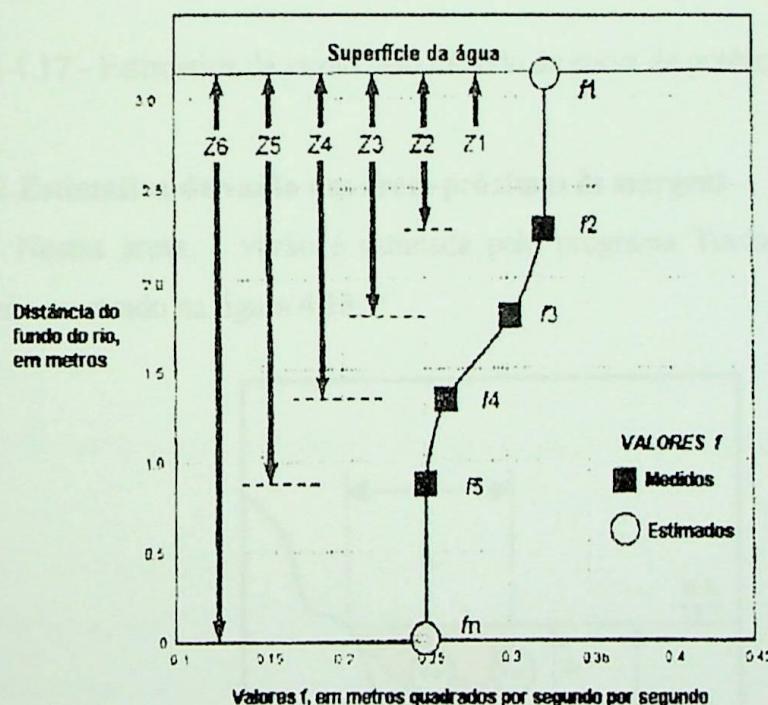


Figura 4.16 – Estimativa da vazão pelo método constante.

Curva de Potência

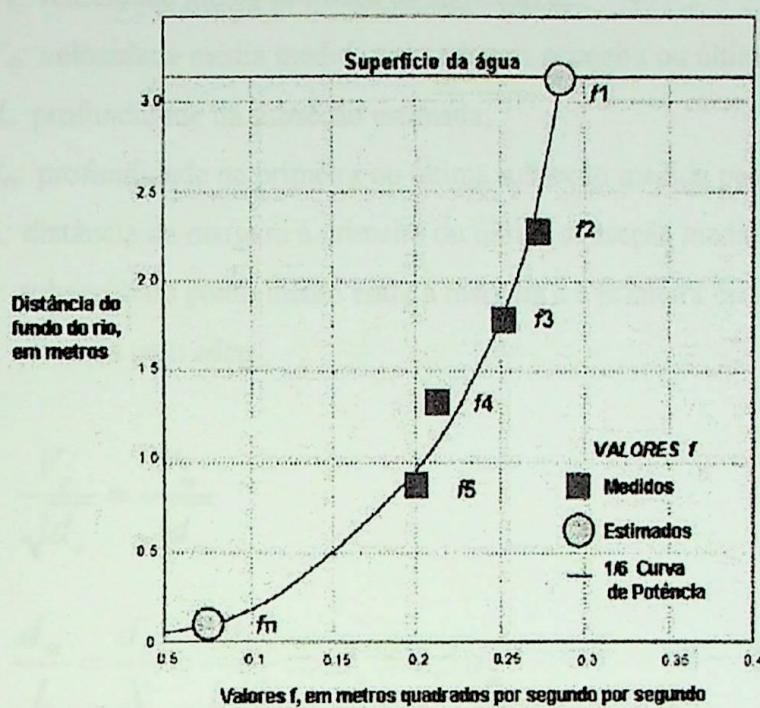


Figura 4.17 - Estimativa da vazão pelo método da curva de potência.

4.4.7.2 Estimativa da vazão nas áreas próximas às margens

Nestas áreas, a vazão é estimada pelo programa Transect, de acordo com o esquema mostrado na figura 4.18.

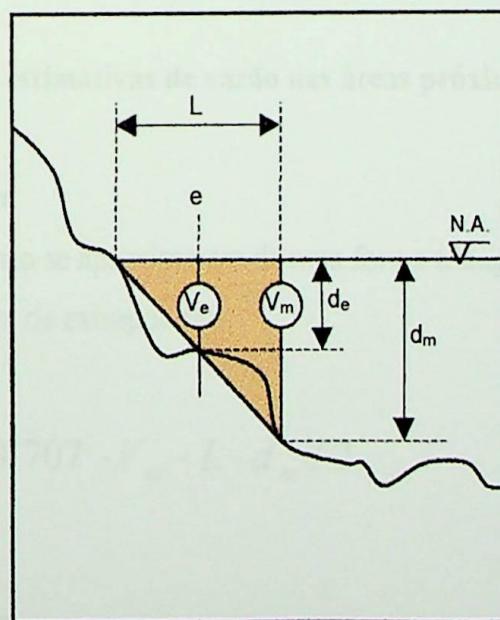


Figura 4.18 - Esquema para estimativa de áreas próximas às margens, não medidas pelo ADCP.

Parâmetros:

V_e : velocidade média estimada na subseção e;

V_m : velocidade média medida pelo adcp na primeira ou última subseção;

d_e : profundidade na subseção estimada;

d_m : profundidade na primeira ou última subseção medida pelo adcp;

L : distância da margem à primeira ou última subseção medida pelo adcp;

e : subseção no ponto médio entre a margem e a primeira ou última subseção medida pelo adcp.

$$\frac{V_e}{\sqrt{d_e}} = \frac{V_m}{\sqrt{d_m}} \quad (4.9)$$

$$\frac{d_m}{L} = \frac{d_e}{X} = \frac{d_e}{L/2} \Rightarrow d_e = 0,5 d_m \quad (4.10)$$

$$\frac{V_e}{\sqrt{0,5 d_m}} = \frac{V_m}{\sqrt{d_m}} \Rightarrow V_e = \sqrt{0,5} V_m \Rightarrow V_e = 0,707 V_m \quad (4.11)$$

$$Q_e = V_e A_e \Rightarrow Q_e = (0,707 V_m)(0,5 L d_m) \quad (4.12)$$

4.4.7.2.1 Equações para estimativas de vazão nas áreas próximas às margens

a) Área triangular

Se as margens do rio se aproximarem de uma forma triangular, figura (4.19.a), utiliza-se da seguinte regra de extrapolação:

$$Q_{marg\ em} = 0,707 \cdot V_m \cdot L \cdot d_m / 2 \quad (4.13)$$

b) Área retangular

Se as margens do rio se aproximarem a uma seção retangular, Figura (4.19.b), utiliza-se da regra de extrapolação dada pela equação 4.14:

$$Q_{m \text{ arg } em} = 0,91 \cdot V_m \cdot L \cdot d_m \quad (4.14)$$

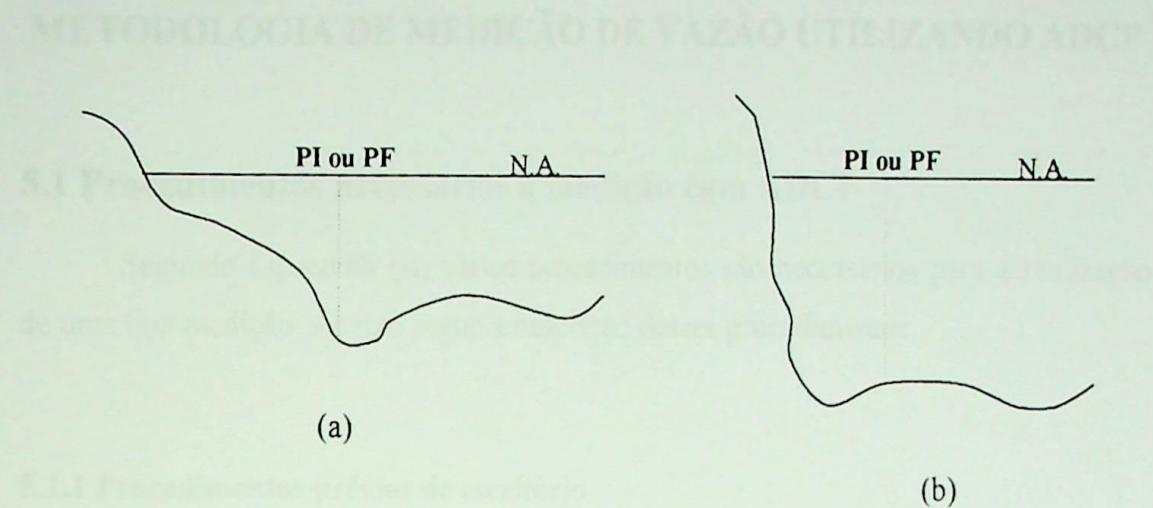


Figura 4.19 - Formas aproximadas das áreas próximas às margens, não alcançadas pelo ADCP: (a) triangular; (b) retangular.

As áreas da seção não alcançadas pelo ADCP são o maior obstáculo para o seu uso em pequenos e médios cursos d'água. Portanto, para que o ADCP forneça bons resultados nestas condições, é necessário que todas as características da seção de medição sejam cuidadosamente consideradas e os procedimentos de medição sejam rigorosamente seguidos.

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA DE MEDIÇÃO DE VAZÃO UTILIZANDO ADCP

5.1 Procedimentos necessários à medição com ADCP

Segundo Lipscomb (-), vários procedimentos são necessários para a realização de uma boa medição. Abaixo segue a descrição desses procedimentos.

5.1.1 Procedimentos prévios de escritório

Para evitar perda de tempo em campo e assegurar que os dados coletados sejam completos e precisos, alguns procedimentos prévios são recomendados. Estes procedimentos incluem uma averiguação do programa computacional e dos equipamentos auxiliares utilizados com o instrumento, visando adequação e atualização dos mesmos.

5.1.1.1 Revisões de programa e equipamento

Tendo em vista que a tecnologia do ADCP é nova e ainda está em desenvolvimento, tem havido freqüentes atualizações de programa e equipamento associados ao sistema. Muitas destas atualizações resultam somente em pequenas melhorias ao processamento interno da velocidade ou capacidade de saída de dados e não irão afetar substancialmente a qualidade das medições de vazão feitas com o instrumento.

Menos freqüentemente, grandes atualizações podem afetar a qualidade de dados de velocidade medida ou de vazão. Atualizações deste tipo requerem testes de campo em locais especiais para validação dos resultados, assegurando que o instrumento está funcionando de acordo com os padrões exigidos.

Antes que o ADCP seja levado ao campo, a mais recente versão do programa computacional deve ser instalada no computador de campo. Porém, neste trabalho foi utilizado o programa "Transect", em ambiente DOS (figura 5.1), e não a versão mais recente, o programa "WinRiver", que não se encontrava disponível por ocasião dos

trabalhos de campo. Também deve ser mantida uma cópia do programa em disquete junto ao computador, na eventualidade de que a cópia no disco rígido seja apagada inadvertidamente.

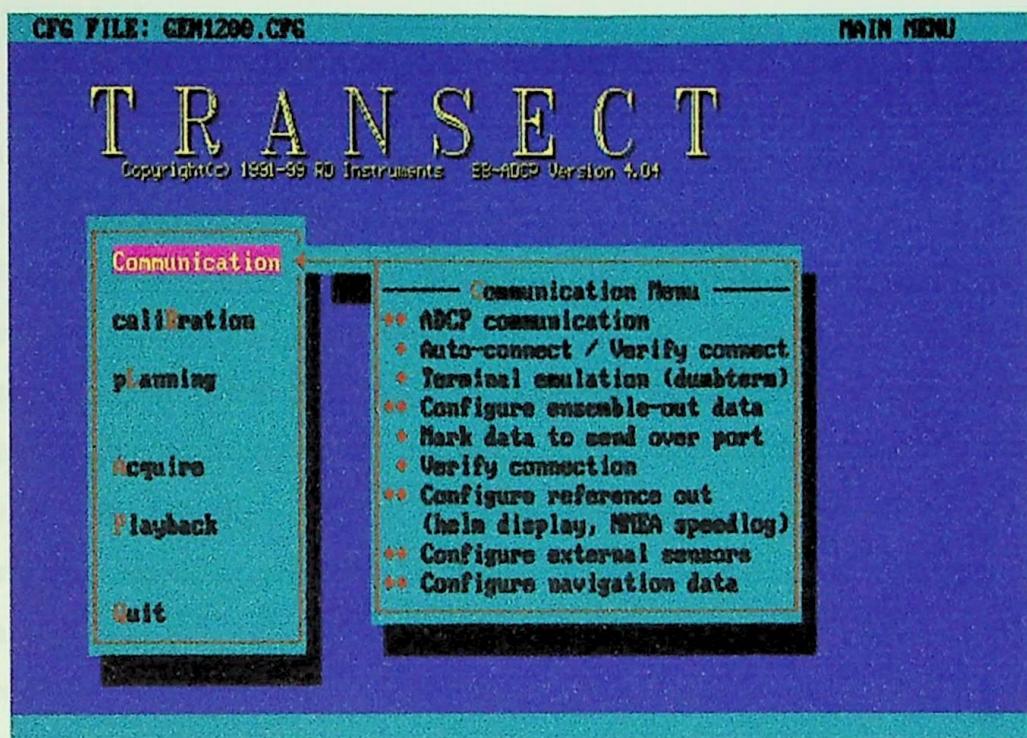


Figura 5.1 - Janela principal do programa Transect.

5.1.1.2 Inspeção prévia

Uma inspeção prévia deve ser feita para assegurar que o instrumento está funcionando corretamente. Esta inspeção consiste em conectar o ADCP ao computador que será usado em campo, conectando-o também a uma fonte de energia e ligando-o para verificar seu funcionamento. O sistema então pode ser averiguado acessando-se o modo "Acquire", aquisição, do programa Transect, para ver se o sistema está pronto para realizar a aquisição de dados. Se forem encontrados problemas neste ponto, deve-se consultar os manuais do ADCP e do programa.

Na inspeção prévia, deve ser averiguada a inclusão, na caixa de ferramentas, de todos os cabos e conectores exigidos para o serviço e qualquer peça reserva que possa ser difícil de obter em campo, como baterias para o ADCP e o computador, cabos e disquetes para fazer cópias dos arquivos de dados.

5.1.2 Procedimentos de campo

A fim de assegurar a precisão e a perfeição dos dados coletados, recomenda-se que sejam seguidos alguns procedimentos gerais de campo, descritos a seguir:

5.1.2.1 Instalação no barco

O ADCP é geralmente fixado na lateral de um barco ou em um vão através do seu casco. O instrumento deve ser fixado rigorosamente na posição vertical, de maneira que os transdutores fiquem, pelo menos, 8 cm abaixo da superfície da água. Em águas agitadas, os transdutores devem ficar mais abaixo para assegurar que suas faces fiquem submersas e que não ocorra cavitação em suas proximidades durante toda a medição. O suporte usado para fixar o ADCP ao barco deve ser desenhado para resistir às forças combinadas de velocidade da água, resultantes do movimento do barco e da velocidade da corrente. Deve-se ainda observar a posição dos sensores em relação à direção do escoamento, tomando-se o cuidado para que o sensor de número 3 seja colocado voltado para a direção perpendicular ao escoamento (figura 5.2). No arranjo utilizado para as medições na estação fluviométrica FECI (figura 5.3), o sensor de número 3 não estava alinhado de acordo com a linha de centro do barco, pois o mesmo era deslocado lateralmente. Portanto, este sensor foi girado em 45° com relação à figura 5.2 para que sua posição estivesse correta.

O suporte deve ser projetado de tal maneira que o instrumento possa ser rapidamente içado ou rotacionado para fora da água, quando do deslocamento entre um local e outro, ou para cruzar rapidamente a seção de medição. O ADCP não deve ser fixado próximo de estrutura de aço ou qualquer material de ferro que possa afetar o funcionamento da bússola interna do instrumento. Por esta razão, um barco de aço não deve ser usado e o instrumento deve ser fixado o mais afastado possível de qualquer objeto de ferro no barco, tal como um motor com alguma parte de ferro fundido. Um procedimento baseado na experiência é o de manter a bússola, localizada próxima ao topo do ADCP, longe de qualquer objeto de ferro no barco por pelo menos a maior dimensão do objeto.

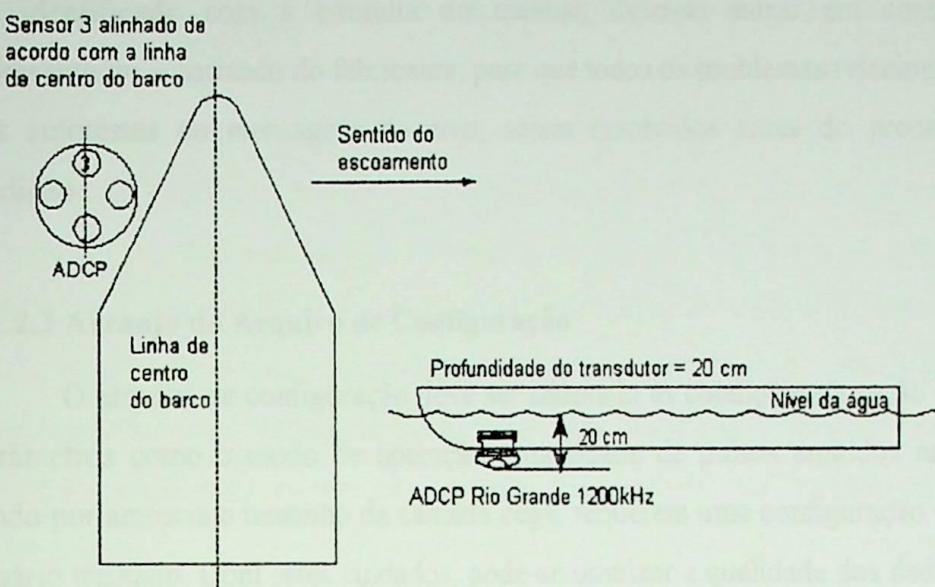


Figura 5.2 - Posição do sensor nº 3 e profundidade do transdutor.

5.1.2.2 Averiguação do Instrumento

Após a fixação do ADCP no barco e a conexão dos cabos ao computador e à fonte de energia, o instrumento deve ser averiguado para assegurar que todos os circuitos e sensores estão funcionando adequadamente. Várias sub-rotinas no "BBTALK", que é um programa fornecido como parte do pacote de programas do ADCP, realizam um diagnóstico e testes de calibração no instrumento, mostrando seu arranjo interno. Juntamente com o programa "WinRiver", também é fornecido o programa "DumbTerm", que realiza funções semelhantes às do "BBTALK". Se o instrumento falhar em qualquer sub-rotina do autoteste, os manuais do ADCP e do "Transect", ou "WinRiver", devem ser consultados. Se forem coletados dados, eles deverão ser marcados como suspeitos e a natureza do teste que falhou, documentada na seção de observações da planilha de campo do ADCP.

Durante o início da comunicação entre o computador e o ADCP, é realizada uma comparação do arquivo de configuração e do arranjo interno do ADCP. Se o ADCP não responde ou se quaisquer mensagens de erro são exibidas na tela, os manuais do ADCP e do Transect devem ser consultados. Estes problemas, geralmente, podem ser resolvidos conferindo se as conexões foram bem feitas, verificando o arquivo de configuração para alterar os parâmetros de comunicação, a freqüência do transdutor ou a orientação do instrumento, para cima ou para baixo, se necessário. Se o problema não

for identificado com a consulta do manual, deve-se entrar em contato com o representante autorizado do fabricante, para que todos os problemas relacionados à falha dos autotestes ou mensagens de erro, sejam resolvidos antes do procedimento de medição.

5.1.2.3 Arranjo do Arquivo de Configuração

O arquivo de configuração deve ser adaptado às condições da seção de medição. Parâmetros como o modo de operação, quantidade de pulsos emitidos na água e no fundo por amostra e tamanho da camada cega, requerem uma configuração feita por um usuário treinado. Com estes cuidados, pode-se otimizar a qualidade dos dados coletados nas condições existentes.

Geralmente, o arquivo de configuração é armazenado no computador, separadamente dos arquivos que contém os dados brutos de velocidade. Portanto, cada arquivo de dados brutos deve estar ligado de alguma forma ao arquivo de configuração usado durante a coleta de dados, para que os parâmetros usados durante a revisão e o pós-processamento dos arquivos de dados brutos sejam os mesmos que aqueles usados durante a aquisição. Para maior segurança, os arquivos de dados brutos e de configuração, usados para uma medição específica, devem ser salvos no disco rígido do computador e copiados para um disquete, logo que terminar a medição. O nome do arquivo de dados brutos, associado ao respectivo arquivo de configuração utilizado na medição, deve ser anotado na planilha de campo.

5.1.2.4 Medições de vazão

Os procedimentos para a realização da medição incluem critérios de seleção do local, configuração do arquivo de medição e pós-processamento de dados brutos.

Antes que os dados de vazão sejam coletados com o ADCP, devem ser anotadas em uma planilha de campo, informações preliminares descrevendo local, data, equipe de trabalho, equipamentos e versões de programa usados. O restante da planilha deve ser completado durante a coleta dos dados. As informações relacionadas à distância do instrumento às margens, no início e final das medições individuais, aos dados brutos e nomes dos arquivos de configuração, devem ser inseridas imediatamente à solicitação

do programa e anotadas na planilha de campo. Estas informações são críticas para o cálculo da vazão e qualquer demora na sua inserção aumentará a probabilidade de erros.

As medições individuais podem ser vistas como vazões instantâneas de um determinado local. É, portanto, necessário fazer a média de várias medições para reduzir a variação devida à turbulência e ondas de velocidade. Em geral, pelo menos **quatro medições** devem ser feitas em cada seção, para assegurar uma determinação válida da vazão. Um número maior de medições será necessário sob certas condições, como em fluxo extremamente turbulento. Se qualquer uma das quatro primeiras medições diferir da vazão média por mais que 5%, ela deve primeiramente ser avaliada para determinar se há alguma razão que justifique descartá-la. A decisão de descartar uma medição deve ser feita com base em uma amostra ruim; a distância em linha reta que difere significativamente da distância total percorrida; qualquer coisa que possa ter afetado os perfis de velocidade durante a medição, como tráfego de barcos próximo à seção; ou quaisquer outros fatores. Se uma medição for descartada, outra deve ser feita para substituí-la, pois o **resultado final** é calculado pela média de, pelo menos, quatro medições. Se não houver razão que justifique o descarte da medição, devem ser feitas quatro medições adicionais e todas elas, incluindo essa suspeita, devem ser inclusas no cálculo da média.

Durante uma medição individual, o ADCP mede a velocidade na coluna d'água em relação ao movimento do barco, no qual ele está fixado. A velocidade do barco em relação ao fundo rio é também medida e é usada para calcular a real velocidade da água. Este cálculo assume que o leito do rio é fixo. Se, entretanto, o leito do rio for móvel, o cálculo da velocidade real da água terá um erro. Conseqüentemente, a avaliação do movimento do leito é necessária antes da medição. Esta avaliação pode ser feita ancorando-se o barco ao leito ou a um objeto fixo, como uma ponte, ou prendendo o barco a um local fixo dentro do rio, enquanto são coletadas várias amostras de dados. Se o leito for estável, a exibição da trajetória do barco não indicará movimento significativo do mesmo após um período de poucos minutos. Se, contudo, o leito estiver se movendo, isso será refletido na exibição da trajetória por um aparente movimento gradual do barco na direção de montante. Se este movimento for significativo em relação à média da velocidade na coluna d'água, deve ser encontrado um local alternativo para a medição. Freqüentemente, o movimento do leito varia consideravelmente de um ponto a outro através do rio. Como resultado, pode ser

necessário verificar este movimento em vários locais, para assegurar que o leito é estável em todo o rio.

5.1.2.5 Verificação da qualidade dos dados

Para a verificação da qualidade dos dados obtidos, deve-se usar o módulo "Playback" do programa Transect, após a realização de cada medição. Neste módulo, pode ser feita a revisão de cada arquivo de dados bruto com o objetivo de verificar se os dados são completos e não incluem amostras ruins, se as profundidades e as velocidades não excedem os limites prescritos para o instrumento e se os picos de velocidade foram gravados, porque, neste caso, a velocidade da corrente se iguala à velocidade de ambigüidade. Medições em condições que excedem as limitações do instrumento ou que contém picos de velocidade, não devem ser incluídas na determinação de um valor final de vazão. Se um arquivo de dados bruto contém amostras ruins de velocidade ou picos de velocidade, a medição deve ser repetida até que pelo menos quatro medições completas, sem dados ruins, tenham sido obtidas.

Uma vez que um número suficiente de medições tenha sido feito e revisado, a seção de estimativa de vazão próxima da margem, deve ser completada na planilha de campo para a determinação da vazão total, incluindo estas partes não medidas. O programa Transect contém uma função para realizar estimativas das vazões próximas à margem, com base nas primeiras e últimas velocidades válidas e nas profundidades medidas. Deve ser tomado cuidado na determinação da direção do movimento do barco durante a coleta das amostras que serão usadas para determinação da vazão próxima à margem. A direção de barco determina se um sinal positivo ou negativo deve ser atribuído à vazão estimada, antes que a vazão total seja calculada.

A cota de uma seção de réguas ou alguma outra referência deve ser obtida antes e depois de cada medição e anotada na planilha de campo. Na análise dos dados obtidos, deve ser observado se houve alteração na cota, pois isto causará alterações nos resultados das vazões.

5.1.2.6 Avaliação da Medição

Uma avaliação global deve ser feita após o término da medição. Esta avaliação é baseada em um julgamento qualitativo das condições encontradas na medição e na

quantidade de travessias individuais. Também deve ser avaliada a porcentagem da área total da seção medida. Condições como turbulência, redemoinhos, fluxos contrários e proximidade de objetos de ferro, que, sob certas circunstâncias, podem afetar os resultados das medições, devem ser anotadas na planilha de campo e usadas na avaliação da medição.

O desvio médio e o desvio-padrão da medição e o coeficiente de variação (CV), que é a relação entre o desvio-padrão e a vazão média (σ/Q), devem ser calculados. O CV então deve ser anotado como uma porcentagem na planilha de campo. Ele é uma medida do agrupamento das medições individuais ao redor da sua média e é uma ferramenta estatística para uma avaliação quantitativa da medição, Lipscomb (-). Se o CV for maior que 5 porcento, devem ser feitas medições adicionais. Em alguns casos, uma ou mais medições estarão aparentemente longe da média e resultarão em um grande CV. Se houver uma razão óbvia para a variação, a medição pode ser eliminada do cálculo da média da vazão, depois que as circunstâncias forem anotadas na planilha de campo. Medições adicionais podem ser necessárias se uma ou mais forem eliminadas, para que pelo menos quatro, sejam usadas no cálculo da média. A média final da vazão é avaliada e anotada na planilha de campo. Esta média é baseada na avaliação qualitativa da medição e o CV fornece uma medida quantitativa da precisão.

Depois que a planilha de campo for completada, deve ser feita uma cópia de segurança, em disquete, de todos os arquivos de dados brutos e de configuração, resultantes das medições.

5.1.3 Procedimentos Pós-campo

O ADCP deve ser inspecionado após o término das medições, para a verificação da condição do instrumento, conectores, cabos e caixa de transporte. Danos ou uso inadequado a qualquer um dos componentes devem ser informados ao responsável pela manutenção do instrumento.

5.1.3.1 Revisão da medição de vazão

Todas as medições de vazão devem ser revisadas no escritório. Atenção especial deve ser dada ao cálculo da vazão total, incluindo estimativas das parcelas próximas às margens. A cota da régua e todos os cálculos usados para determinar a vazão média

devem ser averiguados. Deve ainda ser feita, uma revisão da planilha de campo, para que haja precisão e perfeição de resultados.

5.1.3.2 Documentação e arquivamento das medições de vazão

O programa Transect inclui uma opção para a geração de um arquivo de saída padrão, que contém a informação do arquivo de configuração e um resumo da medição. Neste arquivo estarão incluídas informações como largura, profundidade, área, velocidade média e vazão da seção de medição. Até que esta opção esteja disponível, os dados brutos devem ser processados e um arquivo de saída ASCII gerado. Este arquivo contém um resumo de dados de, aproximadamente, 30 verticais igualmente espaçadas através da seção de medição.

Devem ser impressas cópias da configuração, autoteste de subsistema e arquivos de resumo das medições. Elas devem ser anexadas à planilha de campo para arquivamento logo após o retorno do campo.

A geração de cópia em papel, dos arquivos de dados brutos, não é aconselhável por causa do seu tamanho e do formato binário. Contudo, estes arquivos contêm informações que devem ser guardadas, como vetores horizontais e verticais de velocidade, calculados para cada amostra.

5.2 Metodologia de medição de vazão com ADCP

5.2.1 Medições em grandes cursos d'água

O primeiro passo para a realização de uma medição de vazão com ADCP é a escolha de uma seção transversal adequada. Isto pode ser feito com o uso de um ecobatímetro, como ferramenta de reconhecimento. Duas travessias, uma de ida e outra de volta, são necessárias se houver movimento de sedimento de fundo ou a suspeita do movimento. Caso exista este problema, uma nova seção deve ser escolhida. Inicia-se a medição, através do programa, acessando-se os módulos de comunicação, configuração e planejamento. Feito isto, o barco é posicionado tão próximo quanto possível de uma das margens. O critério para a escolha do ponto de posicionamento do barco está condicionado, principalmente, a dois fatores: o ponto deve ter profundidade suficiente

para que o barco não toque o leito do rio e o instrumento, neste ponto, deve ser capaz de medir a velocidade em, pelo menos, duas células de profundidade. Isto pode ser verificado através da janela "Tabular", no modo de aquisição do programa Transect. A distância entre o barco e a margem é determinada com o uso de um clinômetro. O módulo de aquisição de dados do programa é iniciado e pede ao operador para digitar a distância inicial até a margem. O barco então atravessa a seção com uma velocidade adequada às condições de fluxo da mesma, ou seja, com velocidade menor que a máxima velocidade da água. Durante a travessia, os resultados de medição de cada subseção são exibidos seqüencialmente na tela do computador. No final da travessia, o barco é posicionado tão próximo quanto possível da outra margem, seguindo o mesmo critério descrito para o início da travessia. O operador informa ao programa que a medição terminou e a distância até a margem é determinada. O programa, então, pede ao operador para digitar a distância final até a margem. Se o modo de gravação estiver ativado, todos os dados de velocidade fornecidos pelo ADCP, intervalos de tempo e informação de erro são gravados para posterior revisão e análise. Outra medição pode ser iniciada imediatamente, se desejado.

5.2.2 Medição em pequenos e médios cursos d'água

Em pequenos e médios cursos d'água, a metodologia deve ser modificada, devido ao fato de que as condições são bastante diferentes das encontradas em grandes rios. Em alguns casos, devido às pequenas dimensões da calha, a medição de vazão é bastante facilitada, podendo ser realizada através de um cabo estendido transversalmente à seção, de cima de uma ponte ou com um pequeno barco, motorizado ou não. Entretanto, rios pequenos e médios possuem um comportamento hidráulico bastante dinâmico, que pode ser observado principalmente no caso de eventos de cheias, cuja ocorrência é de curta duração. Neste caso, as velocidades são altas e a quantidade de sedimentos e objetos arrastados é grande, exigindo para a realização de medições, soluções que possibilitem uma operação rápida e segura, tanto para o aparelho quanto para os operadores.

Quanto às operações de configuração do aparelho, coleta de dados e análise posterior dos mesmos, os procedimentos são os mesmos descritos anteriormente. Porém, com relação às técnicas utilizadas para realizar a transposição do aparelho, de uma margem a outra, procedimentos diferenciados são exigidos para cada seção de

medição, em função das características físicas do local, comportamento hidráulico do rio e existência de obras hidráulicas que possam ser utilizadas.

Assim como em grandes rios, a medição de vazão com o ADCP em pequenos e médios rios, também pode ser realizada utilizando-se de um barco com dimensões, obviamente, bem menores, podendo ser motorizado ou não, dependendo das dimensões da seção e das condições de vazão.

Caso a seção possua largura pequena, dificultando o uso de um barco motorizado, pode ser adotado um arranjo que consiste em dois cabos paralelos, estendidos entre as margens. O ADCP é, então, fixado ao barco e operado por um técnico posicionado no centro do mesmo. Há, neste caso, a necessidade de dois ajudantes, cada um em uma das extremidades. O barco é movimentado pelos ajudantes ao longo do cabo, que permanece fixo. Na figura 5.3 é mostrado um arranjo com esta solução.

Em algumas situações, como na ocorrência de cheias, torna-se demasiadamente arriscado realizar medições em barcos tripulados, devido à ocorrência de altas velocidades de escoamento e transporte de materiais e objetos de grandes dimensões. Nesses casos, a alternativa mais segura é realizar a medição posicionando-se sobre uma ponte e fixando-se o ADCP sobre um dispositivo flutuador, que irá ser deslocado de uma margem a outra. Para tal, é necessária a utilização de um cabo especial, de grande comprimento, para realizar a conexão entre o ADCP e o computador, que permanece sobre a ponte. Entretanto, a maior dificuldade é construir um dispositivo flutuador que tenha estabilidade em condições de fluxo turbulento, ou seja, que tenha robustez e mantenha os sensores submersos, sem muita alteração de suas posições quando em movimento.



Figura 5.3 - Foto de um arranjo para medição com ADCP em pequenos cursos d'água, utilizado na estação fluviométrica FECI.

5.2.3 Dispositivos para fixação do ADCP

Como visto anteriormente, para que a medição com o ADCP forneça bons resultados, é necessário que o aparelho sempre esteja parcialmente submerso na água. Se algum dos sensores estiver fora d'água, ou ocorrerem bolhas de ar sob os mesmos, durante a medição, o valor de vazão resultante certamente terá erro. Portanto, os dispositivos para a fixação do instrumento, devem atender a estes requisitos.

Alguns exemplos de dispositivos são: suporte fixo (figuras 5.4 e 5.5), prancha de "bodyboard" (figura 5.6), pequena balsa feita com tubos de PVC (figura 5.7), pequeno catamaran com sistema de transmissão de dados via rádio/modem (figura 4.2), barco inflável com furo no centro, etc.



Figura 5.4 - Foto de um arranjo com suporte fixo em barco de alumínio, utilizado no Senegal, África.



Figura 5.5 - Foto de arranjo com suporte fixo em barco inflável, utilizado pela USGS.

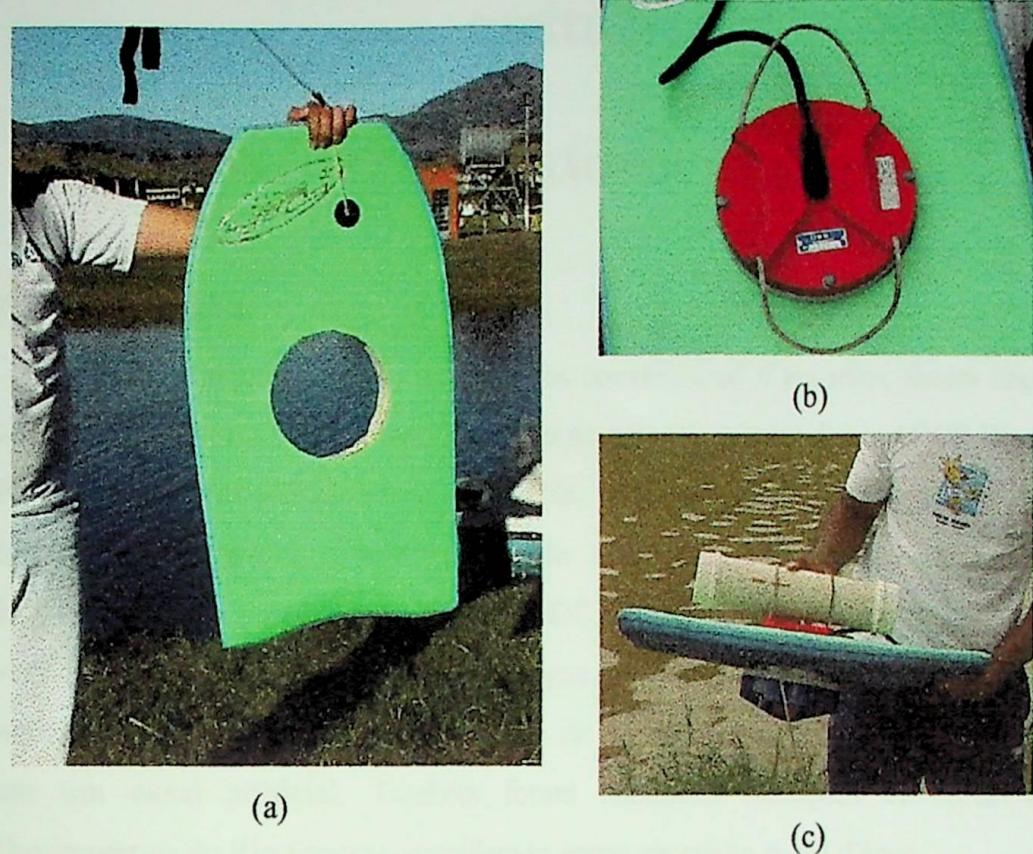


Figura 5.6 - (a) Prancha com furo no centro; (b) Parte superior do ADCP encaixada na prancha; (c) Arranjo utilizado nas medições da estação fluviométrica FECI, em Itajubá.

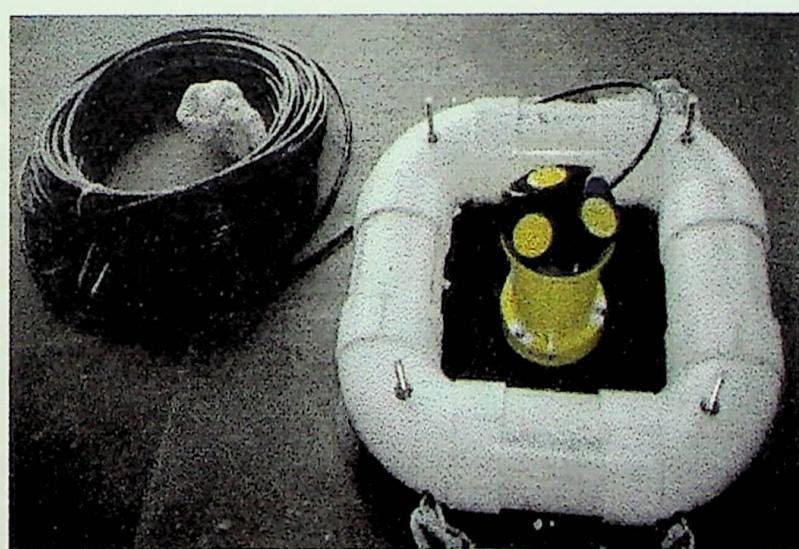


Figura 5.7 - Foto de um ADP fixado em uma pequena balsa feita com tubos de PVC.

CAPÍTULO 6

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

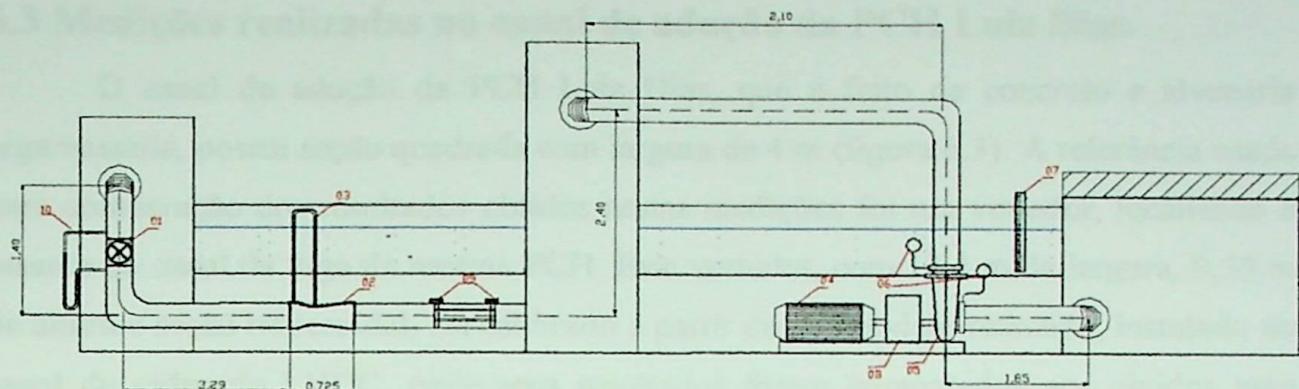
6.1 Introdução

Para comparação entre os métodos convencional e acústico, foram realizados testes e medições. O instrumento utilizado no método acústico foi o ADCP Workhorse Rio Grande, com freqüência de 1200 kHz, cujas características são apresentadas no anexo I. O primeiro teste foi realizado na bancada de ensaios do Laboratório Hidromecânico Didático Científico - LHDC, localizado na EFEI, com o objetivo de verificar o funcionamento do ADCP em água limpa. Foram feitas medições no canal de adução da PCH Luiz Dias com o objetivo de verificar o funcionamento do instrumento em um canal artificial. Também foram realizadas medições em uma estação fluviométrica do Rio Sapucaí, considerado como um médio curso d'água.

6.2 Teste realizado no canal de vidro do LHDC

A bancada de ensaios do LHDC é composta de um canal de vidro com seção de 0,5 m de largura por 0,92 m de altura, um medidor Venturi, um vertedor retangular e outros dispositivos (figura 6.1). Para a realização deste teste, o ADCP foi fixado no centro do canal, parcialmente submerso. A distância entre a face do transdutor e o fundo do canal era de 0,6 m (figura 6.2).

De acordo com seu princípio de funcionamento, há necessidade de que existam partículas em suspensão na água, para que as ondas acústicas emitidas pelo transdutor possam ser refletidas de volta para o mesmo, possibilitando, assim, a identificação das velocidades da água. Neste teste, a vazão foi nula, comprovando a impossibilidade de medir com o instrumento em água limpa.



- 01 - Válvula gaveta
- 02 - Medidor Venturi
- 03 - Manômetro
- 04 - Motor elétrico
- 05 - Bomba
- 06 - Manômetro
- 07 - Limnímetro
- 08 - Acoplamento Hidrocinético
- 09 - Manômetro
- 10 - Manômetro

Figura 6.1 - Bancada de ensaios do LHDC.

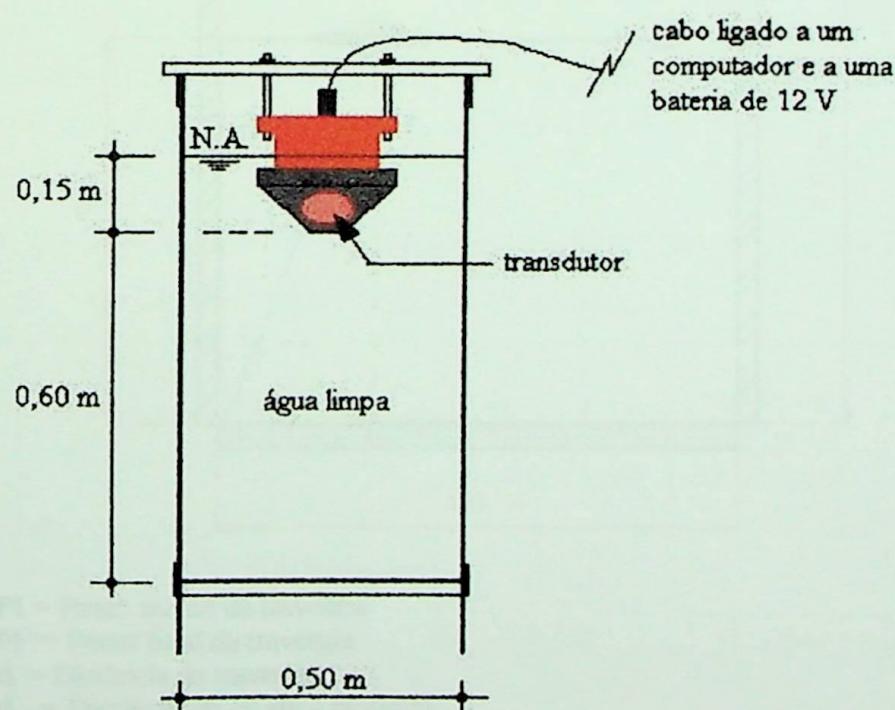


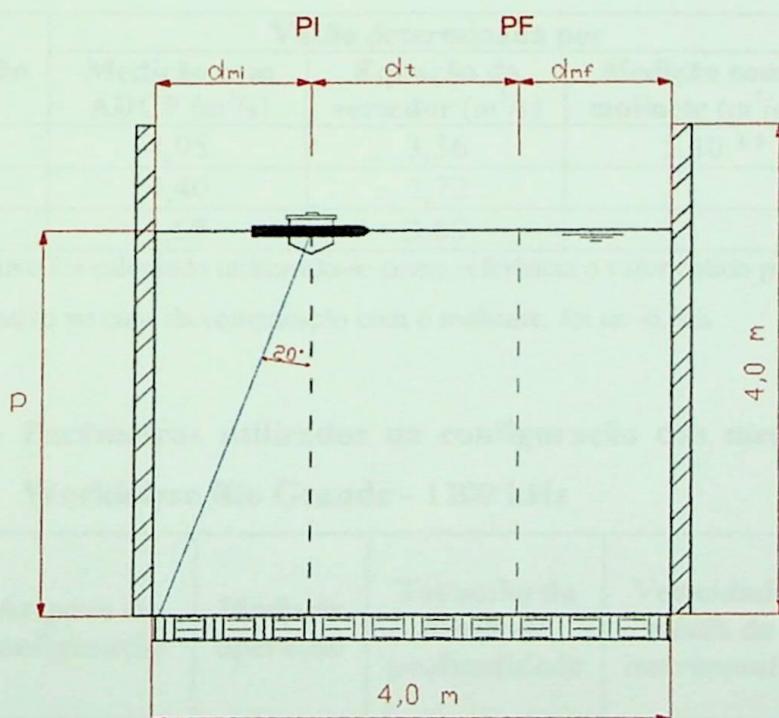
Figura 6.2 - Esquema do teste do ADCP realizado no canal de vidro do LHDC.

6.3 Medições realizadas no canal de adução da PCH Luiz Dias

O canal de adução da PCH Luiz Dias, que é feito de concreto e alvenaria argamassada, possui seção quadrada com largura de 4 m (figura 6.3). A referência usada para comparação dos resultados obtidos nestas medições foi um vertedor, localizado a jusante do canal de fuga da mesma PCH. Este vertedor, com 13,4 m de largura, 0,55 m de altura e seção trapezoidal, foi calibrado a partir de um modelo reduzido, instalado no canal de vidro do LHDC, onde seus resultados foram comparados aos obtidos pelo medidor Venturi. A equação ajustada para o vertedor é a seguinte:

$$Q = 1,9655 \cdot b \cdot h_v^{1,458} \quad (6.1)$$

Uma das medições também foi comparada com o resultado obtido pelo método dos molinetes.



PI = Ponto inicial da travessia

PF = Ponto final da travessia

d_t = Distância da travessia

d_{mi} = Distância do PI até a margem

d_{mf} = Distância do PF até a margem

p = Profundidade

Figura 6.3 - Esquema utilizado para a medição de vazão com ADCP no canal de adução da PCH Luiz Dias.

As medições foram realizadas com o auxílio de uma prancha de "bodyboard", com 0,45 m de largura e 0,82 m de comprimento, que foi guiada por meio de uma corda presa na mesma e do cabo do próprio instrumento. A limitação do ADCP para uso em canais deste tipo está no fato de haver influência dos feixes de onda laterais no erro da medição. Neste caso, deve ser respeitada uma determinada distância dos pontos inicial e final da travessia às paredes do canal, calculada a partir do ângulo entre os feixes acústicos e a vertical, que é de 20°. Portanto, o ângulo entre as paredes do canal e os referidos pontos, deve ser maior que 20° (figura 6.3).

O método de extrapolação utilizado no programa Transect para a estimativa das áreas não medidas dos perfis de velocidades foi o da curva de potência. Para a estimativa das áreas próximas às margens, foi usada a opção "square", para áreas quadradas ou retangulares.

Tabela 6.1 - Resultados obtidos no canal de adução da PCH Luiz Dias

Nº da medição	Vazão determinada por			Desvio relativo (*) (%)
	Medição com ADCP (m ³ /s)	Equação do vertedor (m ³ /s)	Medição com molinete (m ³ /s)	
1	4,95	3,36	5,30 **	+47,3
2	4,40	2,72	-	+61,8
3	3,68	3,69	-	-0,3

* O desvio relativo foi calculado utilizando-se como referência o valor obtido pela equação do vertedor.

** O desvio relativo no caso da comparação com o molinete, foi de -6,6%.

Tabela 6.2 - Parâmetros utilizados na configuração das medições com o ADCP

Workhorse Rio Grande - 1200 kHz

Nº da medição	Arquivo de configuração	Modo de operação	Tamanho da célula de profundidade	Velocidade média do instrumento	Distância dos pontos inicial e final da travessia às paredes do canal
1	SH1200.cfg	8	10 cm	0,6 m/s	1,25 m
2	SH1200.cfg	8	10 cm	0,6 m/s	1,50 m
3	GEN1200.cfg	1	25 cm	0,6 m/s	1,25 m

6.4 Medições realizadas na Estação Fluviométrica FECI

A estação avaliada está localizada no Rio Sapucaí, na Sub-bacia do Rio Grande, Bacia do Rio Paraná, em Itajubá, Minas Gerais. A largura da seção é de,

aproximadamente, 18 m, com uma profundidade média de 2,4 m e uma profundidade máxima em torno de 3,5 m (figura 6.4). As velocidades médias ficaram em torno de 0,75 m/s e as vazões variaram de 8,7 a 13,6 m³/s.

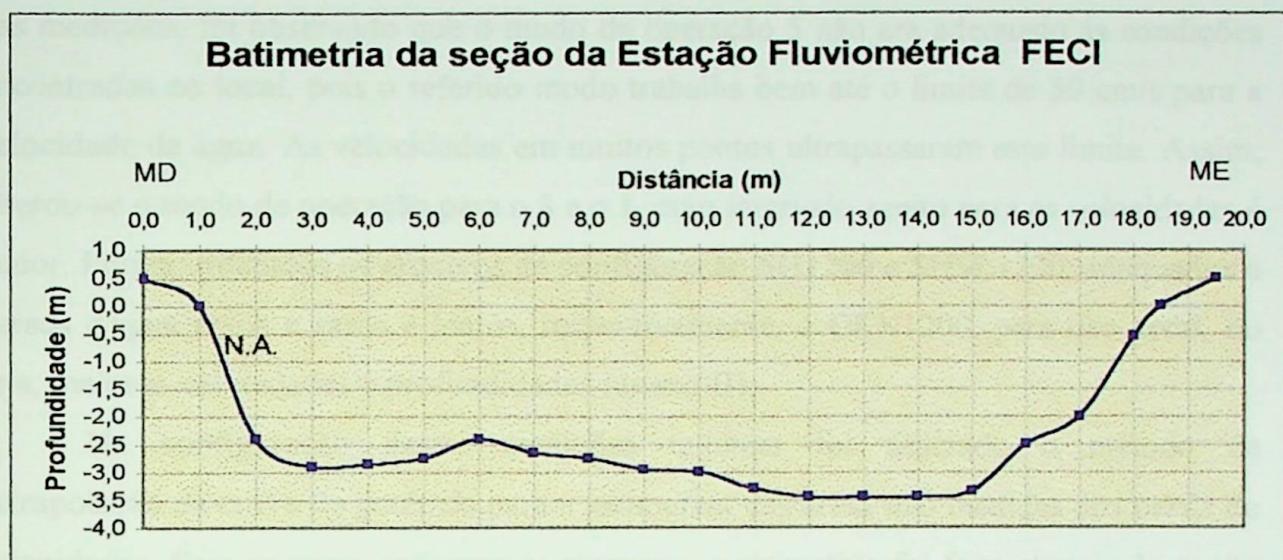


Figura 6.4 - Batimetria da seção da estação fluviométrica FECI.

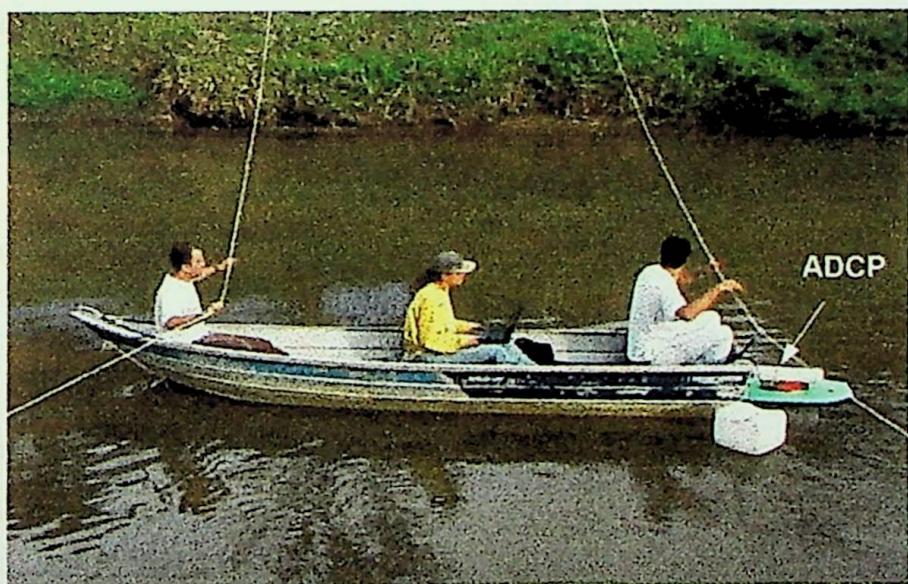


Figura 6.5 - Foto de uma medição na estação fluviométrica FECI.

Para as medições realizadas na estação fluviométrica FECI, foi utilizado o esquema mostrado na figura 6.5. Devido à pequena largura da seção, optou-se pelo uso de cordas, amarradas no PI e no PF da mesma, em vez do uso de um motor de popa.

Desta forma, o barco foi guiado por duas pessoas: uma na proa e outra na popa do barco. Para este esquema também foi utilizada a prancha de "bodyboard", para fixação do ADCP.

Foram realizadas 18 medições, resultando em 18 conjuntos de dados. Na maioria das medições, foi observado que o modo de operação 5 não era adequado às condições encontradas no local, pois o referido modo trabalha bem até o limite de 50 cm/s para a velocidade da água. As velocidades em muitos pontos ultrapassaram este limite. Assim, alterou-se o modo de operação para o 8 e o 1, cujo intervalo aceito para as velocidades é maior. Foram utilizados os arquivos de configuração SH1200 e SHSL1200, adequados a cursos d'água rasos e rasos e lentos, respectivamente, e GEN1200, para uso geral, ou seja, maiores velocidades e profundidades (anexo II).

Na configuração destas medições também foi utilizado o método de extrapolação da curva de potência para a estimativa das áreas não medidas dos perfis de velocidades. Para as áreas próximas às margens, a estimativa foi feita através da opção "triangular".

Para a análise estatística dos dados, foi utilizado o coeficiente de variação, CV , cujo limite é de 5%. Acima deste valor, a variação é muito alta e a precisão fica bastante comprometida.

O CV foi calculado para cada conjunto de dados, separadamente, pela seguinte fórmula:

$$CV = \frac{\sigma}{Q_m} \quad (6.2)$$

Onde:

σ = desvio padrão;

Q_m = vazão média, em m^3/s .

Nos casos onde o CV ultrapassou o limite permitido, alguns dados foram descartados com base no intervalo estabelecido pela média \pm desvio-padrão, e um novo CV foi calculado. Este processo foi repetido até que ele fosse menor ou igual a 5%, com um número mínimo de quatro dados (medições). Sendo assim, dos 18 conjuntos de dados, 13 atenderam a este critério (tabela 6.3) e 5 foram descartados, como pode ser visto no anexo IV.

Os valores médios de vazão, obtidos para cada um dos 13 conjuntos, foram comparados aos valores obtidos da curva-chave da estação (tabela 6.4).

Tabela 6.3 - Resultados obtidos na estação fluviométrica FECI

Nº da medição	Data (Ano 2000)	Cota (cm)	Medição com ADCP (m ³ /s)	CV (%)	Arquivo de configuração	Modo de operação	Tamanho da célula de profundidade (cm)
1	12/07	90	9,15	2,89	SHSL	5	5
2	14/07	90	8,68	4,46	SHSL	5	5
3		90	9,58	4,07	SHSL	8	5
4	20/07	100	9,60	1,70	SHSL	5	5
5	01/09	92	10,35	4,44	SHSL	5	10
6		92	10,66	3,59	SH	5	10
7		92	12,05	2,09	SHSL	8	10
8	18/09	95	11,86	4,60	SH	8	10
9		95	9,76	2,33	SH	5	10
10	11/10	88	9,53	4,91	GEN	1	10
11		88	9,45	4,67	GEN	8	10
12		88	9,40	5,00	SH	1	10
13	05/12	112	13,60	1,59	GEN	1	25

Tabela 6.4 - Comparação das medições de vazão com ADCP e a curva-chave da estação

Nº da medição	Vazão determinada por		Desvio relativo (*) (%)
	Medição com ADCP (m ³ /s)	Curva-chave (m ³ /s)	
1	9,15	7,35	+24,5
2	8,68	7,35	+18,1
3	9,58	7,35	+30,3
4 **	9,60	10,45	-8,1
5	10,35	7,99	+29,5
6	10,66	7,99	+33,4
7	12,05	7,99	+50,8
8	11,86	8,93	+32,8
9	9,76	8,93	+9,3
10	9,53	6,70	+42,2
11	9,45	6,70	+41,0
12	9,40	6,70	+40,3
13	13,60	13,81	-1,5

* Para o cálculo dos desvios relativos, foi utilizado como referência o valor obtido pela curva-chave.

** A medição nº 4 também pode ser comparada com o valor obtido pelo método dos molinetes, que foi de 11,64 m³/s, resultando num desvio de -21,2%.

O resultado da medição nº 13 (tabela 6.4) teve o menor desvio relativo, ou diferença, entre as medições pelos dois métodos, apenas 1,5%. Para esta medição, os parâmetros utilizados foram os mesmos usados na medição de nº 3 do item 6.3 (tabela 6.2), que também forneceu a menor diferença com relação ao método de referência.

Em uma primeira análise, os melhores resultados levam à conclusão de que a configuração utilizada nas respectivas medições, que foi a mesma para os dois casos, é a melhor para as condições dos locais avaliados.

6.4.1 Correlação entre as medições realizadas com o ADCP e a curva-chave

Para a determinação da correlação entre as medições, a relação entre elas foi estudada com o auxílio de um gráfico, chamado diagrama de dispersão, e de uma medida, chamada coeficiente de correlação linear. Quando uma das variáveis está, de alguma forma, relacionada com a outra, significa que há uma correlação entre elas.

6.4.1.1 Diagrama de dispersão

Para confecção do diagrama de dispersão foram utilizados os 13 conjuntos de dados, cujas vazões médias são mostradas na tabela 7.3. Considerando que as médias finais estão relacionadas a valores de cotas (níveis do rio), estes pares (cota, vazão) foram colocados em eixos x e y (figura 6.6). Para os treze pares de pontos foi ajustada uma curva, de modo que todos os pares ficassem equidistantes da mesma (figura 6.7). Para comparação desta curva com a curva-chave da estação, foi feita uma extração, pois ela não tinha dados para as mesmas cotas que as da curva-chave. Após este procedimento, foram selecionados seis valores de cota e, a partir destes, retirados os valores correspondentes de vazão para ambas as curvas. Estes seis novos pontos foram colocados em um diagrama de dispersão, mostrado na figura 6.9.

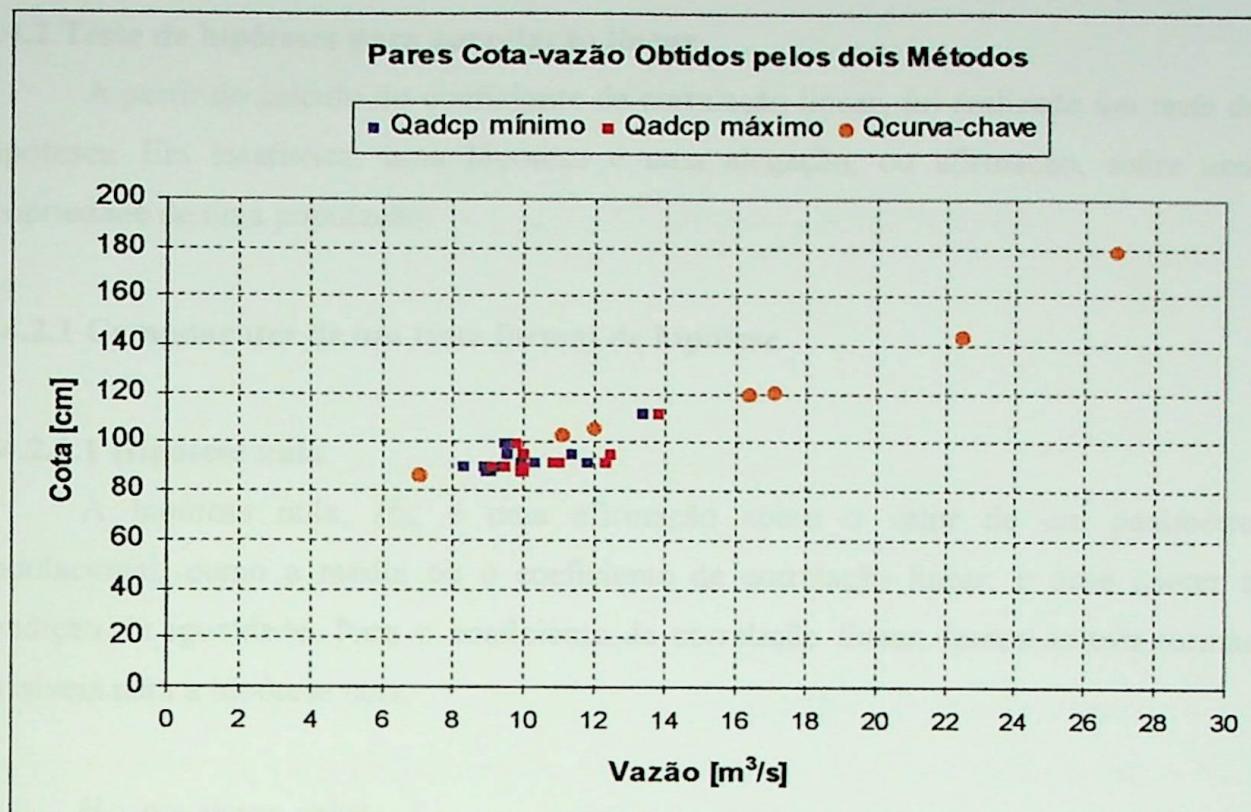


Figura 6.6 - Gráfico com os pares cota-vazão obtidos pelos dois métodos.

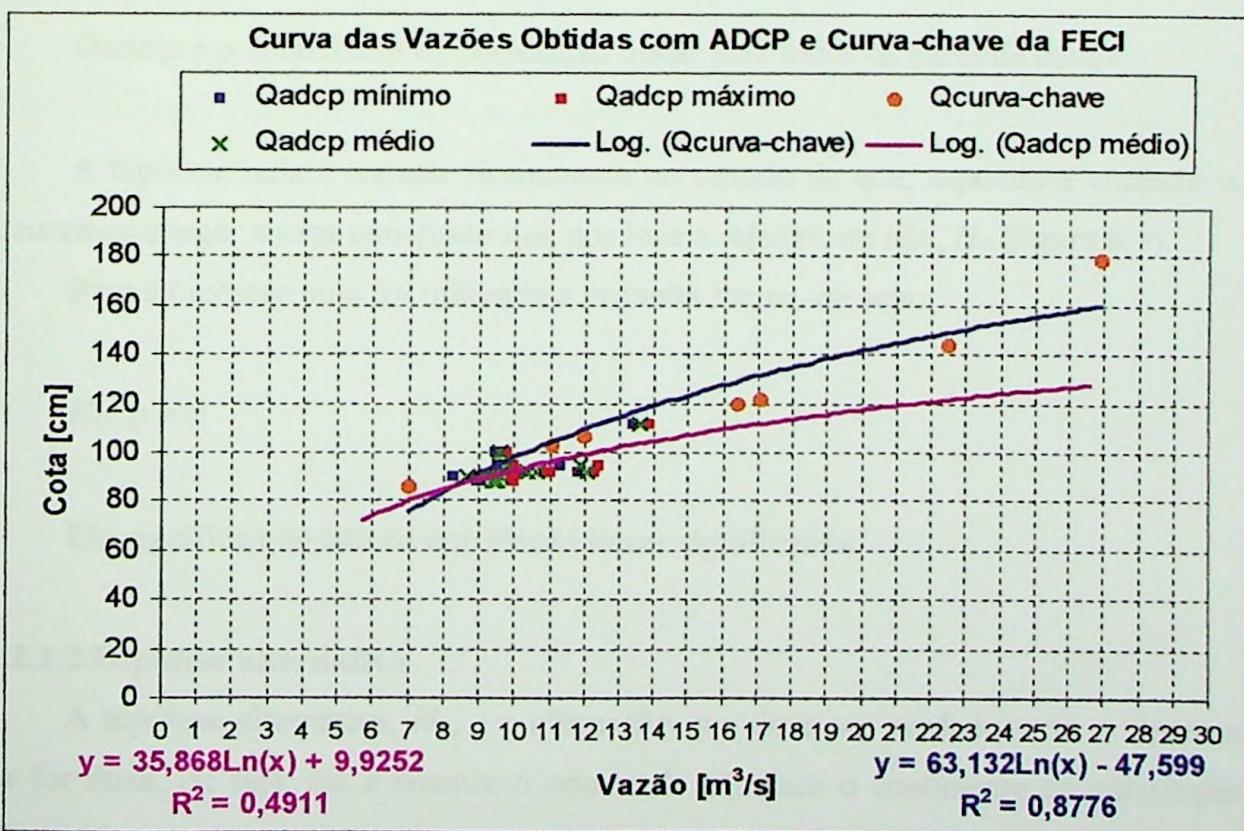


Figura 6.7 - Curva das vazões obtidas com ADCP e curva-chave da FECI.

6.4.2 Teste de hipóteses para correlação linear

A partir do cálculo do coeficiente de correlação linear, foi realizado um teste de hipóteses. Em estatística, uma hipótese é uma alegação, ou afirmação, sobre uma propriedade de uma população.

6.4.2.1 Componentes de um teste formal de hipótese

6.4.2.1.1 Hipótese nula

A hipótese nula, H_0 , é uma afirmação sobre o valor de um parâmetro populacional, como a média ou o coeficiente de correlação linear, e deve conter a condição de igualdade. Para o coeficiente de correlação linear, temos as três formas possíveis para a hipótese nula:

$$H_0: \rho = \text{algum valor}$$

$$H_0: \rho \leq \text{algum valor}$$

$$H_0: \rho \geq \text{algum valor}$$

Onde ρ é o coeficiente de correlação linear para todos os pares de dados.

A hipótese nula é testada diretamente no sentido de que, supondo-a verdadeira, procuramos chegar a uma conclusão que nos leve a rejeitar, ou não, H_0 (figura 6.8).

Para a hipótese nula foi utilizada a primeira forma, ou seja:

$$H_0: \rho = 0$$

Ela significa que não há correlação linear significativa.

6.4.2.1.2 Hipótese alternativa

A hipótese alternativa, H_1 , é a afirmação que deve ser verdadeira se a hipótese nula for falsa, ou seja, ela é sempre o oposto de H_0 . Para o coeficiente de correlação linear, a hipótese alternativa comporta apenas uma das três formas:

$$H_1: \rho \neq \text{algum valor}$$

$H_I: \rho < \text{algum valor}$

$H_I: \rho > \text{algum valor}$

Para a hipótese alternativa também foi utilizada a primeira forma:

$H_I: \rho \neq 0$

Elá significa que há correlação linear significativa.

6.4.2.1.3 Nível de significância

Após o estabelecimento das hipóteses, deve ser escolhido um nível de significância, α . O intervalo de confiança $1 - \alpha$, corresponde à de probabilidade de que a hipótese aceita seja verdadeira. No caso, foi escolhido um nível de significância de 0,05, ou de 5%, por ser o mais utilizado neste tipo de análise. Este nível proporciona bom equilíbrio entre a precisão e a confiabilidade.

6.4.2.1.4 Coeficiente de correlação linear

O coeficiente de correlação linear, r , mede o grau de relacionamento linear entre os valores emparelhados x e y em uma amostra, e é calculado pela seguinte expressão:

$$r = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{n(\sum x^2)} - (\sum x)^2 \sqrt{n(\sum y^2)} - (\sum y)^2} \quad (6.3)$$

O cálculo do r resultou no valor de 0,997.

Para todos os pares de valores (x,y) , r pode ser representado por ρ .

6.4.2.1.5 Estatística de teste

A estatística de teste é um valor baseado nos dados amostrais. Ela é utilizada para a tomada de decisão sobre a rejeição da hipótese nula. Para o caso de pequenas amostras, utiliza-se a Distribuição t de Student como uma estatística de teste, onde t é calculado pela seguinte fórmula:

$$t = \frac{r}{\sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}} \quad (6.4)$$

O valor de t , calculado pela equação 6.4, é 23,92.

Os valores críticos de t foram tirados da Distribuição t de Student, anexo VI, com $n - 2$ graus de liberdade, ou seja, quatro graus de liberdade. O número de graus de liberdade para um conjunto de dados corresponde ao número de valores que podem variar após terem sido impostas certas restrições a todos os valores. Se o valor absoluto da estatística de teste excede os valores críticos, a hipótese nula deve ser rejeitada. Caso contrário, ela é aceita. Para $\alpha = 0,05$, os valores críticos de t são -2,776 e +2,776, obtidos para um teste bilateral. Portanto, o valor de t excede seus valores críticos, o que significa que H_0 deve ser rejeitada. A conclusão deste teste é que há evidência suficiente de que existe uma correlação linear entre os métodos analisados.

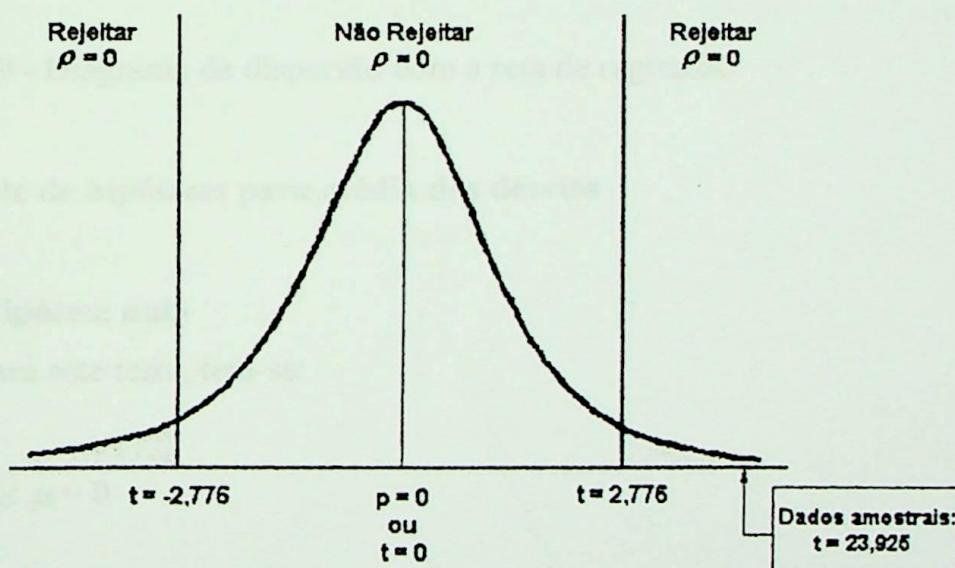


Figura 6.8 - Teste de $H_0: \rho = 0$.

6.4.3 Reta de regressão

A reta de regressão é o gráfico da equação de regressão, que descreve a relação entre as duas variáveis analisadas (figura 6.9). Neste caso, a equação de regressão dos dados obtidos nas medições, é dada por:

$$y = 2,2673x - 10,847 \quad (6.5)$$

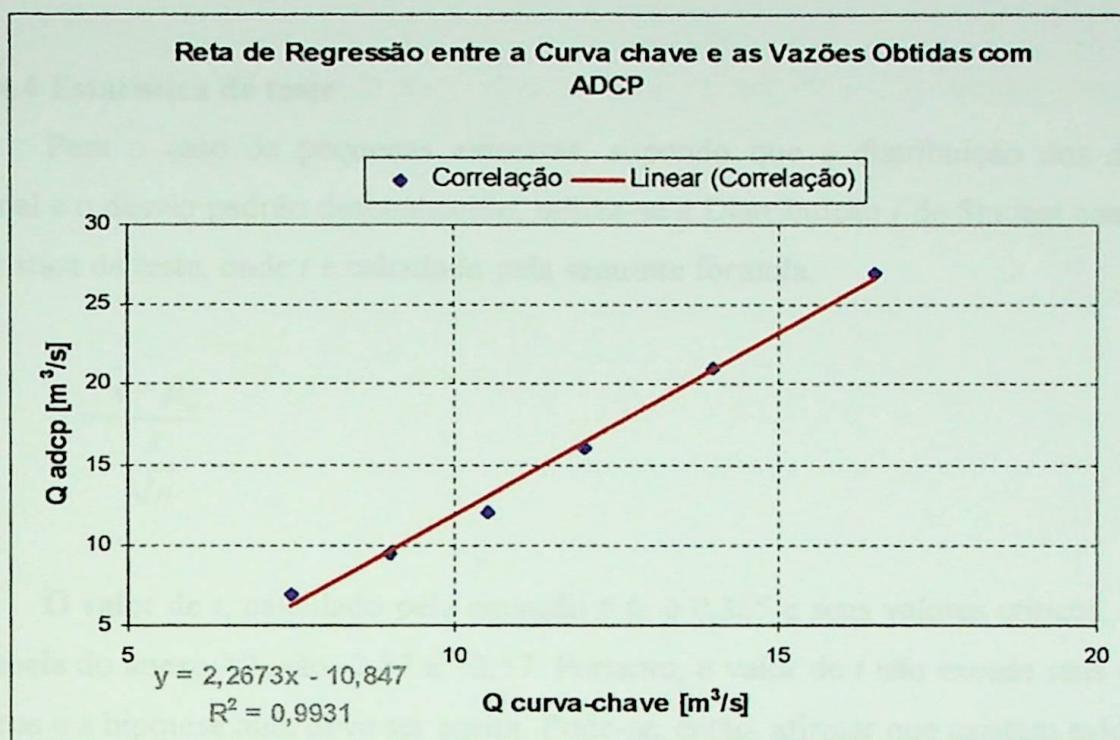


Figura 6.9 - Diagrama de dispersão com a reta de regressão.

6.4.4 Teste de hipóteses para média dos desvios

6.4.4.1 Hipótese nula

Para este teste, tem-se:

$$H_0: \mu = 0$$

Ela significa que a média dos desvios é igual a zero.

6.4.4.2 Hipótese alternativa

A hipótese alternativa, sendo o oposto de H_0 , é:

$$H_1: \mu \neq 0$$

Ela significa que a média dos desvios não é igual a zero.

6.4.4.3 Nível de significância

O nível de significância escolhido é o mesmo do primeiro teste, ou seja, 0,05.

6.4.4.4 Estatística de teste

Para o caso de pequenas amostras, supondo que a distribuição dos dados é normal e o desvio padrão desconhecido, utiliza-se a Distribuição t de Student como uma estatística de teste, onde t é calculado pela seguinte fórmula:

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_x}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (6.6)$$

O valor de t , calculado pela equação 6.6, é 0,365 e seus valores críticos, tirados da tabela do anexo VI, são -2,57 e +2,57. Portanto, o valor de t não excede seus valores críticos e a hipótese nula deve ser aceita. Pode-se, então, afirmar que existem evidências suficientes, dentro de um intervalo de confiança de 95%, de que a média dos desvios é zero, ou se aproxima de zero.

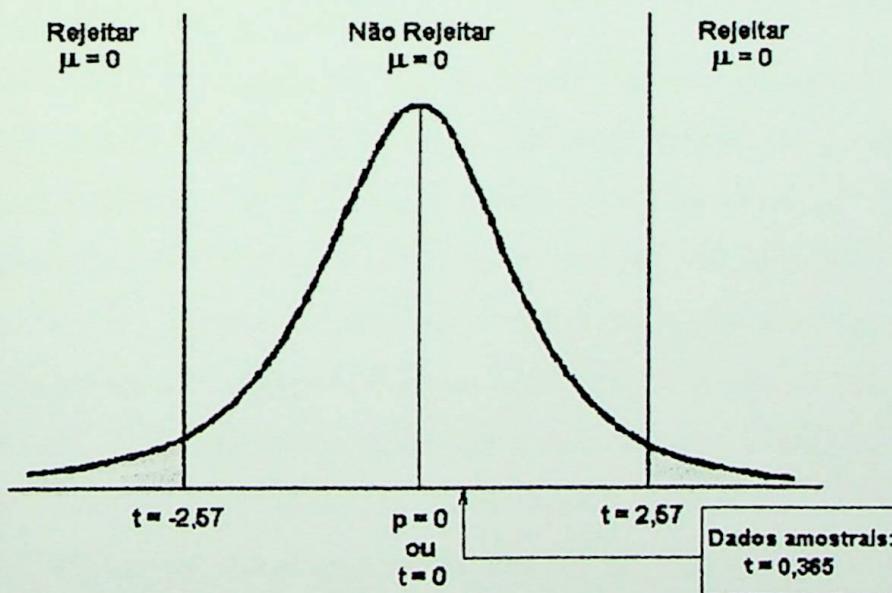


Figura 6.10 - Teste de $H_0: \mu = 0$.

Os testes estatísticos aplicados aos dados da estação fluviométrica FECI

forneceram bons resultados, indicando que, apesar do reduzido número de dados analisados, há indícios de que o ADCP seja adequado para uso em pequenos e médios cursos d'água.

Contudo, uma análise mais detalhada pode ser feita através do cálculo das incertezas das medições, descritas no anexo V.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Devido à larga experiência no uso do molinete para medição de vazão, este se tornou, ao longo de tempo, o método mais viável, tanto no aspecto técnico, como no econômico. São equipamentos que apresentam equações, tabelas ou curvas confiáveis, produzindo medições precisas e com manutenção simples, consistindo somente em uma checagem visual e medição de poucos itens ou dimensões, para assegurar seu bom funcionamento.

Com métodos não convencionais, medidas de vazões precisas somente são obtidas através do uso de curvas ou tabelas especialmente preparadas, obtidas através de testes de calibração. A precisão destes métodos não pode ser determinada por inspeção visual, o que exige a realização de recalibrações periódicas dos instrumentos.

Contudo, com o uso do ADCP, que é um método não convencional, tem-se conseguido vantagens com relação aos métodos convencionais. O instrumento apresenta maior praticidade e maior quantidade de dados, além de efetuar a medição de vazão em tempo real.

Trata-se de uma tecnologia que tem sofrido refinamento ao longo do tempo e tem ganhado a aceitação da comunidade técnica e científica para a medição de velocidade e vazão em cursos de água.

As principais vantagens do uso do ADCP, quando comparado com o método convencional, usando molinete, ou outro medidor pontual de corrente são: tempo reduzido para realização da medição; a coleta dos dados pode ser feita ao longo da coluna d'água e da seção transversal em vez de ser feita pontualmente; cabos de aço ou outros dispositivos usados em medições convencionais são desnecessários porque o instrumento mantém uma trajetória durante a travessia da seção, contanto que o leito do rio seja estável; e o instrumento pode ser fixado em um barco, eliminado assim a instalação e a manutenção de cabos de aço na seção a ser medida.

Como principais desvantagens do uso do ADCP, quando comparado com o método convencional do molinete, tem-se: o alto custo inicial; a incapacidade para funcionar em águas muito rasas; a complexidade operacional, exigindo do operador um bom conhecimento de física, eletrônica e do programa utilizado com o instrumento; e as freqüentes atualizações de equipamentos e programas computacionais, devido à tecnologia ser recente. Estas atualizações geralmente resultam em melhorias na precisão

dos dados coletados, porém, podem causar problemas em lidar com dados coletados através de sistemas e programas computacionais antigos.

Como era sabido, no decorrer deste trabalho de dissertação, verificou-se que o aparelho é inoperante em águas limpas ou com pouco sólido em suspensão, o que não acontece com os métodos convencionais.

Em canais estreitos, o uso do ADCP mostrou-se limitado. Esta limitação está relacionada com o fato de haver influência dos feixes de ondas laterais que induzem a erros na aquisição de dados pelo instrumento. Entretanto, esta limitação pode ser superada observando-se as distâncias mínimas necessárias entre o instrumento e as margens do canal, conforme mostrado no capítulo 6.

Em profundidades menores que 0,8 m, o instrumento utilizado não forneceu bons dados, o que comprovou a profundidade mínima especificada pelo fabricante. Portanto, em profundidades iguais e inferiores a este valor deve-se evitar o uso do ADCP, ao menos com a especificação do instrumento utilizado neste trabalho, ou seja, o ADCP Workhorse Rio Grande de 1200 kHz.

É importante salientar que, para a obtenção de bons resultados, é imprescindível que o aparelho seja posicionado em distâncias adequadas das margens, de maneira a medir as velocidades no início e no final da travessia. Caso isso não ocorra, o aparelho deixará de acrescentar as vazões próximas às margens no cômputo da vazão total da seção. Por isso, é necessário, na primeira travessia, feita com o objetivo de reconhecimento da seção a ser medida, atuar na janela "Tabular", do programa Transect, para confirmar a coleta de dados nos pontos inicial e final das travessias. Desta forma garante-se que a estimativa das vazões nas áreas próximas às margens, não alcançadas pelo ADCP, seja realizada pelo programa.

Dos conjuntos de dados obtidos nas medições e analisados neste trabalho, dois tiveram o menor desvio relativo com relação ao método de referência, 0,3 e 1,5%. Como estas medições foram realizadas com a utilização dos mesmos parâmetros de configuração, há um indício de que os mesmos são adequados às condições dos locais analisados. Entretanto, a curva-chave da estação fluviométrica analisada não ofereceu boa precisão devido ao pequeno número de pontos nela contidos.

Para a realização de uma análise estatística com resultados confiáveis é necessário que o número de dados seja o maior possível, entretanto, o processo de coleta de dados, para este tipo de atividade, exige tempo e, quase sempre, tem um custo

elevado. Neste trabalho, o tempo e o apoio logístico para a coleta dos dados foi reduzido, não possibilitando, desta forma, que variadas situações fossem estudadas.

Contudo, este trabalho procurou contribuir no sentido de que, novas tecnologias prescindem de um grande número de testes para adquirirem confiabilidade, já que se procurou, principalmente, verificar a confiabilidade e a adequação do ADCP a pequenos e médios cursos d'água.

Tendo em vista que os objetivos propostos no trabalho de dissertação não foram totalmente alcançados, várias recomendações podem ser feitas para futuros trabalhos, tais como:

- Estudos dos vários tipos de seções de medição, com diferentes características, em pequenos e médios cursos d'água, para melhor determinação do campo de aplicação do ADCP;
- Verificar e analisar as limitações do instrumento quanto à profundidade e largura dos cursos d'água, velocidades mínimas de escoamento e de transposição da seção.
- Desenvolver novos dispositivos para fixação do instrumento ou auxiliar nas medições pode aumentar a praticidade na realização das mesmas;
- Analisar a adequação de outros instrumentos similares, como o ADP, de outros fabricantes, quanto às profundidades menores que as limitadas pelo ADCP;
- Verificar a melhor adequação de programas com versão mais atualizada que o Transect, como é o caso do WinRiver, fornecido pela RD Instruments por ocasião do último treinamento ocorrido na seção do Rio Solimões, em Manacapuru, no estado do Amazonas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BORTONI, E. C. et al. - Hidrometria Básica - Aplicação de Pacotes Gráficos para o Cálculo de Vazões em Canais Abertos, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, 1998.

COIMBRA, R. et al. - Recursos Hídricos - Conceitos - Desafios - Capacitação, Editora ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília, 1999.

FREITAS, M. A. V. et al. - O estado das águas no Brasil - 1999 - Perspectivas de gestão e informação de recursos hídricos, Editora ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, Brasília, 1999.

GOMES, J. e SANTOS, I. - Análise Comparativa de Campanhas de Medição de Descarga Líquida pelos Métodos Convencional e Acústico, XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Belo Horizonte, 1999.

GONZÁLEZ, J.A. et al. - Analysis of open-channel velocity measurements collected with an acoustic doppler current profiler: Rivertech'96, 1st International Conference on New/Emerging Concepts for Rivers, Volume 2, Proceedings, p. 838-845 Chicago, IL, U.S.A., September 22-26, 1996.

LIPSCOMB, S. W. - Quality Assurance Plan for Discharge Measurements Using Broadband Acoustic Doppler Current Profilers United States Geological Survey - Open-File Report 95-701, U.S.A.

MORLOCK, S. E. - Evaluation of Acoustic Doppler Current Profiler Measurements of River Discharge - United States Geological Survey - Water-Resources Investigations Report 95-4218, Indianapolis, IN, U.S.A., 1996.

PINTO, N. L. S. et al. - Hidrologia Básica, Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1976.

SIMPSON, M.R. e OLTMANN R.N. - Discharge-Measurement System Using an Acoustic Doppler Current Profiler with Applications to Large Rivers and Estuaries - United States Geological Survey - Water-Supply Paper 2395, U.S.A., 1993.

SANTOS, E. C. - Análise de Procedimentos Automatizados para Ensaios de Comissionamento de Grupos Geradores em Centrais Hidrelétricas, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, 1999.

SOUZA, Z. et al., Hidrometria Básica - capítulo 3, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, 1998.

TRIOLA, M. F., Introdução à Estatística, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 1998.

TUCCI, C. E. M. et al., Hidrologia - Ciência e Aplicação, Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

ACOUSTIC DOPPLER CURRENT PROFILERS - Principles of operation: A practical primer, RD Instruments, San Diego, U.S.A., 1989/1996.

CURSO MEASUREMENT OF STREAM FLOW USING WORKHORSE ADCPs - Manaus/Manacapuru-AM, ANEEL/RD Instruments, San Diego, USA, 2000.

DIRECT-READING BROADBAND ACOUSTIC DOPPLER CURRENT PROFILER – Manual Técnico, RD Instruments, 1992.

HIDROMETRIA BÁSICA - Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE, São Paulo, 1991.

MEASUREMENT OF FLUID FLOW - Evaluation of uncertainties - British Standard ISO/TR 5168, 1998.

- _____ WATER MEASUREMENT MANUAL - U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, U.S. Government Printing Office, Denver, U.S.A., 1997.
- _____ WORKHORSE RIO GRANDE - River Direct-Reading ADCP - 600/1200 kHz - Catálogo da RD Instruments.
- _____ III CURSO INTERNACIONAL SOBRE TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE DESCARGA LÍQUIDA EM GRANDES RIOS - Manaus/Manacapuru-AM, DNAEE/CGRH – ORSTOM, Brasília, 1997.

ANEXOS

ANEXO I - Características do ADCP Workhorse Rio Grande - 1200 kHz

Perfis de corrente

Tamanho da célula: 0,05 a 4 m

Número de células: 1 a 128

Faixa de velocidade: ± 5 m/s (padrão); ± 20 m/s (máximo)

Profundidade máxima de operação: 18 m

Transdutor e hardware

Freqüência: 1228 kHz

Largura da banda: 300 kHz

Diâmetro da parte cerâmica do transdutor: 51 mm

Ângulo do raio: 20°

Configuração: 4 raios convexos

Material do transdutor: poliuretano

Intensidade do eco

Amostragem: mesmo intervalo utilizado para velocidade

Faixa de trabalho dinâmica: 80 dB

Sensores

Temperatura

Faixa de trabalho: -5 a 45°C

Precisão: $\pm 0,4^\circ\text{C}$

Tilt

Faixa de trabalho: $\pm 20^\circ$

Precisão: $\pm 0,5^\circ$

Bússola

Tipo: flux gate

Precisão: $\pm 0,5^\circ$

Características físicas

Diâmetros e altura: vide figura I.1

Peso no ar: 7,6 kg

Peso na água: 2,2 kg

Programa Transect

Programa para medições de corrente em tempo real e cálculo de vazão, capaz de integrar dados fornecidos pelos transdutores, por GPS e por ecobatímetro. Ele consiste de módulos para planejamento, aquisição e revisão de dados.

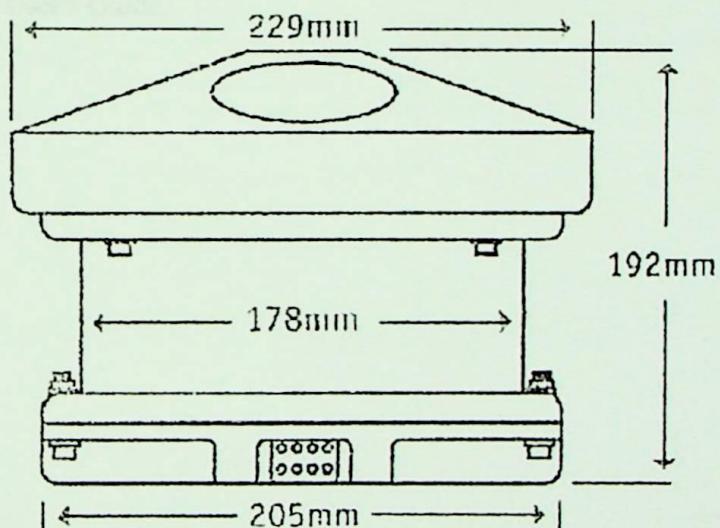


Figura I.1 - Dimensões do ADCP Workhorse Rio Grande - 1200 kHz.

ANEXO II – Arquivos de Configuração do Programa Transect

Tabela II.1 - Arquivos de Configuração - ADCP Workhorse Rio Grande 1200 kHz

Perfilagem Geral Velocidade da Água acima de 10 m/s Extensão Máxima de Perfilagem: 12 m	GEN1200.CFG
Perfilagem de Seção Rasa e Fluxo Lento Velocidade da Água menor que 0,5 m/s Baixa Turbulência Extensão Máxima de Perfilagem: 3,5 m	SHSL1200.CFG
Perfilagem de Seção Rasa Velocidade da Água menor que 1 m/s Turbulência moderada Extensão Máxima de Perfilagem: 3,5 m	SH1200.CFG

Fonte: Rio Grande User's Guide.

ANEXO III – Modos de Operação do ADCP Workhorse Rio Grande - 1200 kHz

Tabela III.1 - Modos de Operação - ADCP Workhorse Rio Grande - 1200 kHz

	Modo 1	Modo 5	Modo 8
Aplicação típica	Fluxo rápido em todas as profundidades. Situações dinâmicas. Bom para rios muito rápidos ou profundos para os modos 5 e 8.	Seções rasas, fluxos lentos com velocidades < 0,5 m/s, com pouca turbulência.	Rios rasos com velocidades < 1 m/s. leito rugoso e/ou turbulência. Trabalha em águas rasas, onde o modo 5 não trabalha bem.
Tamanho mínimo de célula recomendado (m)	0,25	0,05	0,05
Tamanho de célula recomendado (m)	0,25	0,10	0,10
Desvio-padrão de um único pulso (cm/s) (usando tamanho de célula recomendado)	18,0	0,4	7,8
Extensão da primeira célula (m)	0,56	0,35	0,35
Extensão mínima de perfilagem (m)	1,0	0,9	0,6
Extensão máxima de perfilagem (m)	12,0	3,5	3,5
Máxima velocidade relativa (m/s)	10 m/s	0,5 m/s	1 m/s

Especificações para 25 cm de camada cega, temperatura de 10° C e 0,0 ppt de salinidade.

Fonte: Rio Grande User's Guide.

**ANEXO IV – Conjuntos de Dados de Medições da Estação
Fluviométrica FECI, Descartados pelo Critério do
Coeficiente de Variação - Intervalo de Confiança de
67%**

Tabela IV.1 - Dados coletados em 20/07/2000 - Cota: 100 cm

Arq. de configuração: SHSL / Modo de operação: 5 / Tamanho da célula: 5										
Nº	Q1 (m ³ /s)	σ	Intervalo1	Q2 (m ³ /s)	σ	Intervalo2	Q3 (m ³ /s)	σ	Intervalo3	
1	8,40	2,15	8,1164	8,40	0,85	8,8826	10,30	0,66	9,1627	
2	10,60		12,4236	10,60		10,5746	9,10		10,4773	
3	10,30			10,30			10,30			
4	9,10		CV (%)	9,10		CV (%)	10,30		CV (%)	
5	7,10		20,97	10,30		8,70	9,10		6,69	
6	10,30			10,30			9,82			
7	14,50			9,10						
8	10,30			9,73						
9	13,00									
10	9,10									
Q_M	10,27									

* Dados descartados.

Tabela IV.2 - Dados coletados em 18/08/2000 - Cota inicial: 155 cm/final: 146 cm

Arq. de configuração: SH / Modo de operação: 8 / Tamanho da célula: 10										
Nº	Q1 (m ³ /s)	σ	Intervalo1	Q2 (m ³ /s)	σ	Intervalo2	Q3 (m ³ /s)	σ	Intervalo3	
1	21,40	3,92	14,3673	21,40	1,75	16,5767	18,50	1,29	16,8245	
2	16,50		22,2127	16,50		20,0733	19,40		19,4088	
3	10,50			18,50			19,60			
4	18,50		CV (%)	19,40		CV (%)	16,60		CV (%)	
5	19,40		21,45	19,60		9,54	17,90		7,13	
6	19,60			16,60			16,70			
7	16,60			17,90			18,12			
8	25,80			16,70						
9	17,90			18,33						
10	16,70									
Q_M	18,29									

Arq. de configuração: SHSL / Modo de operação: 8 / Tamanho da célula: 10

Nº	Q1 (m ³ /s)	σ	Intervalo1	Q2 (m ³ /s)	σ	Intervalo2	Q3 (m ³ /s)	σ	Intervalo3
1	17,60	3,01	13,2249	17,60	1,53	13,6077	14,00	0,78	13,7445
2	14,00		19,2418	14,00		16,6723	14,60		15,3055
3	14,60			14,60			13,90		
4	13,90		CV (%)	13,90		CV (%)	15,60		CV (%)
5	21,70		18,53	15,60		10,12	14,53		5,37
6	15,60			15,14					
Q_M	16,23								

* Dados descartados.

Tabela IV.3 - Dados coletados em 18/09/2000 - Cota: 95 cm

Arq. de configuração: SHSL1200 / Modo de operação: 5 / Tamanho da célula: 10									
Nº	Q1 (m^3/s)	σ	Intervalo1	Q2 (m^3/s)	σ	Intervalo2	Q3 (m^3/s)	σ	Intervalo3
1	8,70	1,59	8,7253	11,60	1,19	8,9296	9,30	0,99	8,7617
2	11,60		11,9032	9,30		11,3104	11,20		10,7383
3	9,30			11,20			9,50		
4	12,90			9,50			CV (%)		CV (%)
5	11,20		15,41	9,00		11,76	9,75		10,14
6	9,50			10,12					
7	9,00								
Q_M	10,31								

Arq. de configuração: GEN1200 / Modo de operação: 8 / Tamanho da célula: 10

Nº	Q1 (m^3/s)	σ	Intervalo1	Q2 (m^3/s)	σ	Intervalo2	Q3 (m^3/s)	σ	Intervalo3
1	11,90	1,55	10,7103	11,90	0,71	11,3308			
2	11,10		13,8040	11,10		12,7492			
3	12,40			12,40					
4	10,40			11,80			CV (%)		CV (%)
5	11,80		12,62	13,00		5,89			
6	15,20			12,04					
7	13,00								
Q_M	12,26								

* Dados descartados.

Onde:

Q_1 = vazão medida.

Q_2 = vazão contida no intervalo 1.

Q_3 = vazão contida no intervalo 2.

Q_M = vazão média.

σ = desvio-padrão.

Intervalo 1 = $Q_M 1 \pm \sigma$.

Intervalo 2 = $Q_M 2 \pm \sigma$.

Intervalo 3 = $Q_M 3 \pm \sigma$.

CV = coeficiente de variação.

ANEXO V - Incerteza na Medição de Vazão

V.1 Definições de termos relacionados à precisão

Precisão é a habilidade de produzir o mesmo valor, dentro de um dado limite e com sucessivas leituras, de uma quantidade específica medida. A precisão representa o desvio máximo de todas as leituras com relação à média. O erro é o desvio de uma medição, observação ou cálculo, em relação ao valor verdadeiro.

Tendo em vista que o valor verdadeiro raramente é conhecido, alguns autores preferem usar o termo incerteza.

O erro na medida de uma quantidade é a diferença entre o que é medido e o seu valor verdadeiro, ou seja, é o desvio existente entre o valor medido e o seu valor verdadeiro, ou ainda, é a soma dos erros sistemáticos e aleatórios, identificados em um sistema de medição, IEC - 41 (1991), Noronha (1998) e INMETRO (1997), apud Santos (1999).

Uma grandeza é um valor numérico que representa uma quantidade física participante de um fenômeno, Noronha (1998), apud Santos (1999).

Todos os parâmetros de um ensaio apresentam um valor real. Este valor é uma quantidade numérica que quantifica uma grandeza em um determinado espaço, em um certo instante; assim como, um valor médio é uma quantidade numérica que quantifica uma grandeza em um determinado espaço, em um certo intervalo de tempo, INMETRO (1997) e Noronha (1998), apud Santos (1999).

Uma grandeza apresenta ainda um valor verdadeiro, que é a quantidade que uma grandeza teria que demonstrar, em relação a um padrão de valor perfeitamente conhecido ou a um sistema de medição livre de erros. Porém, de acordo com Mioduski (1982) e Noronha (1993), apud Santos (1999), este valor não existe. Portanto, é utilizado o conceito de valor verdadeiro convencional, que é um valor que contém um erro desprezível, em relação ao erro do sistema de medição analisado, sendo o seu valor ideal, igual ao valor real da medição.

Para aumentar a precisão do instrumento utilizado, faz-se a calibração ou recalibração do mesmo, que consiste na determinação de uma curva e a equação que relaciona o valor real de uma grandeza e o valor lido em um instrumento ou aparelho, dentro da escala de utilização e/ou operação dos mesmos, para uma faixa de confiança

especificada, em relação a um padrão conhecido.

A média aritmética ou esperança de uma série de medidas, \bar{X} , em relação a um padrão, é o valor da razão entre a soma das medidas e/ou leituras realizadas em uma grandeza mensurável dividido pelo número n de medidas e/ou leituras (observações).

A variância, σ^2 , de uma variável aleatória, X , é a esperança do seu desvio quadrático em torno de sua média aritmética. A raiz quadrada positiva da variância é denominada de desvio-padrão experimental, $\sigma^2(X)$. A melhor estimativa da variância de uma grandeza é a variância experimental da média.

V.2 Princípios gerais da análise de incerteza na medição de vazão

V.2.1 Natureza dos erros

O conceito básico da metrologia diz que todas as medições têm erros, até mesmo depois de terem sido feitas todas as correções e calibrações conhecidas. Os erros podem ser positivos ou negativos e ter uma magnitude variável. Muitos erros variam com o tempo. Alguns variam em um período muito curto, enquanto outros variam diariamente, semanalmente, sazonalmente ou anualmente. Aqueles que permanecem constantes, ou aparentemente constantes, durante o teste são chamados de erros sistemáticos. Os erros reais raramente são conhecidos; contudo os limites superiores do erro podem ser estimados. O objetivo é construir um intervalo de incerteza dentro do qual o valor verdadeiro esteja, com uma grande probabilidade.

Os erros são as diferenças entre os valores medidos e o valor verdadeiro, que é sempre desconhecido. O erro total da medição, δ , é dividido em dois componentes: um erro sistemático fixo, β , e um erro aleatório, ε . Em alguns casos, o valor verdadeiro pode ser arbitrariamente definido como o valor que seria obtido por um laboratório de metrologia específico. A incerteza é uma estimativa do erro, que na maioria dos casos não seria excedida. Existem três tipos de erro a serem considerados:

- a) Erros aleatórios;
- b) Erros sistemáticos;
- c) Erros grosseiros.

Raramente é possível dar um limite superior absoluto ao valor do erro. Portanto, é mais praticável dar a ele um intervalo, dentro do qual o valor verdadeiro da quantidade medida possa estar, com uma alta probabilidade. Este intervalo é o dobro da incerteza calculada e é expresso por:

$$[\bar{x} - U, \bar{x} + U] \quad (V.1)$$

Uma medição precisa é a que tem ambos os erros, aleatório e sistemático, pequenos.

V.2.1.1 Erro aleatório

Os erros aleatórios são causados por numerosas pequenas influências independentes, que impedem um sistema de medição de fornecer a leitura correta da quantidade a ser medida. Os dados divergem da média conforme as leis de casualidade e a sua distribuição geralmente se aproxima de uma distribuição normal quando o número de dados aumenta. Os erros aleatórios são chamados algumas vezes de erros de precisão. O desvio-padrão, σ , é usado como uma medida de erro aleatório, ε . Um grande desvio-padrão significa uma grande dispersão nas medições. O desvio-padrão experimental é calculado a partir de uma amostra e é dado pela seguinte expressão:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (V.2)$$

Onde:

N = número de medições;

\bar{x} = média das medições individuais x .

Para a distribuição normal, o intervalo $\bar{x} \pm t_{95} s / \sqrt{N}$ incluirá a média verdadeira, μ , aproximadamente 95% do tempo. A incerteza aleatória da média é $t_{95} s / \sqrt{N}$. Quando o tamanho da amostra é pequeno, é necessário usar o fator de Student, t , ao nível de 95%. Para amostras com tamanho igual ou maior que 30, devem

ser usados dois desvios-padrão experimentais ($2s$) para a estimativa da incerteza aleatória em uma medição individual.

A incerteza aleatória pode ser reduzida realizando-se o maior número possível de medições, calculando-se a média aritmética delas, desde que o desvio padrão da média de N medições individuais seja \sqrt{N} vezes menor que o desvio padrão das medições.

$$\sigma_{\text{média}} = \frac{\sigma_{\text{individual}}}{\sqrt{N}} \quad (\text{V.3})$$

E, analogamente,

$$s_x = \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (\text{V.4})$$

V.2.1.2 Erro sistemático

O segundo componente do erro total é o erro sistemático, β . Para cada nível de medida, este erro é constante para a duração do teste. Em repetidas medições de uma dada amostra, cada medição tem o mesmo erro sistemático. Este erro pode ser determinado somente quando as medições são comparadas com o valor verdadeiro da quantidade medida, e isso raramente é possível. Os erros sistemáticos são considerados, algumas vezes, como influências.

Todos os erros sistemáticos significantes devem ser identificados e considerados. Eles podem acontecer devido aos seguintes fatores:

- a) Correções de calibração imperfeitas;
- b) Imperfeição na instalação de instrumentação;
- c) Redução indevida de dados;
- d) Erros no método; e.
- e) Erros humanos.

Como os verdadeiros erros sistemáticos nunca são conhecidos, usa-se um limite superior, B , na análise de incerteza.

Na maioria dos casos, o erro sistemático, β , pode ser positivo ou negativo. Ou seja, não se sabe se o erro sistemático é positivo ou negativo, e a incerteza sistemática é expressa como $\pm B$. Ela é estimada como um limite superior do erro sistemático.

V.2.1.3 Erro grosso

Os erros grosseiros podem ser erros humanos ou mal-funcionamento de instrumentos, que invalidam uma medição; por exemplo, a transposição de números em dados gravados ou a presença de bolhas de ar em condutos de água de um manômetro. Tais erros não podem ser tratados com análise estatística e, nestes casos, a medição deve ser descartada. Os erros grosseiros devem ser eliminados para que haja um controle correto do processo de medição.

Para assegurar um controle adequado das medições, elas devem ser monitoradas com gráficos estatísticos de controle de qualidade. Correntezas, tendências e movimentos que tornem a situação fora de controle devem ser identificados e investigados. Históricos de dados de calibração são necessários a um controle efetivo.

Para erros desta natureza, alguns testes estatísticos devem ser usados. Estes testes assumem que as observações são normalmente distribuídas. É necessário recalcular o desvio-padrão experimental da distribuição de observações sempre que um dado é descartado devido ao resultado de um teste. Os dados suspeitos não devem ser descartados sem que haja uma razão técnica para acreditar que houve um erro.

V.2.2 Combinação de incertezas elementares

O objetivo e a duração do teste e o número de calibrações relacionadas a ele, afetam a classificação de incertezas em componentes sistemáticos ou aleatórios.

Depois da identificação e classificação das fontes de erros elementares como calibração, aquisição de dados, redução metódica e subjetiva das fontes de erro dos dados, é necessária a utilização de um método para combinar estes componentes elementares em desvio-padrão experimental e incerteza sistemática da medição. O método recomendado é o da raiz quadrada do somatório ou combinação quadrática.

$$s = \sqrt{\sum_j \sum_i s_{ij}^2} \quad (V.5)$$

$$B = \sqrt{\sum_j \sum_i B_{ij}^2} \quad (V.6)$$

V.2.3 Incerteza das medições

A análise de incerteza da medição será completa quando:

- As incertezas sistemáticas e os desvios-padrão da medida tiverem sido propagados para a incerteza do resultado do teste, mantendo os componentes sistemáticos e aleatórios separados;
- Tratando-se de pequenas amostras, tiverem sido calculados, da fórmula de Welch-Satterthwaite, os graus de liberdade do desvio-padrão experimental do resultado do teste;
- As incertezas aleatórias e sistemáticas estiverem combinadas em um único número, para expressar um valor razoável para a incerteza global.

Somente um número, U , é necessário para expressar um limite razoável de erro. Este número, uma combinação das incertezas sistemáticas e aleatórias, tem uma interpretação simples, é, em geral, o maior erro esperado. Por exemplo, é esperado que o valor verdadeiro da medição esteja no intervalo $[\bar{x} - U, \bar{x} + U]$. Desde que as incertezas sistemáticas incluem aquelas baseadas em decisão e não em dados, não há maneira de combinar incertezas aleatórias e sistemáticas para produzir um único número para a incerteza, com um nível estatisticamente confiável. Contudo, desde que este único número seja aceito, são permitidos dois métodos alternativos de combinação:

- 1) Adição linear:

$$U_{ADD} = B + t_{95} s_{\bar{x}} \quad (V.7)$$

- 2) Combinação da raiz quadrada do somatório:

$$U_{RSS} = \sqrt{B^2 + (t_{95} s_{\bar{x}})^2} \quad (V.8)$$

Onde B é a incerteza sistemática da equação (V.6) e $s_{\bar{x}}$ é o desvio-padrão experimental da média. Se as amostras usadas para o cálculo do s forem grandes

($N > 30$), o valor 2,0 pode ser usado para t_{95} . Se as amostras forem pequenas ($N \leq 30$), é necessário utilizar a distribuição t de Student. Há duas situações onde é possível usar um nível de confiança estatístico para o intervalo de incerteza:

- Se a incerteza sistemática for baseada em comparações de laboratório;
- Se a incerteza sistemática for considerada desprezível em comparação com a incerteza aleatória. Neste caso, o intervalo de incerteza é o resultado do teste $\pm t_{95} s_x$, que está no nível de confiança de 95%.

O método da combinação da raiz quadrada do somatório tem uma cobertura de aproximadamente 95% e o da adição linear, entre 95 e 99%.

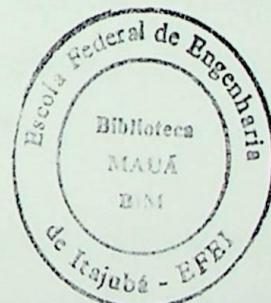
V.2.4 Propagação de incertezas de medição para resultado de teste de incertezas

Se o resultado do teste é uma função de várias medições, os desvios-padrão experimentais e as incertezas sistemáticas das medições devem ser combinados ou propagados para o resultado do teste usando-se fatores de sensibilidade, θ , que relacionam a medição ao resultado do teste.

Em geral, para m medições, o desvio-padrão experimental e a incerteza sistemática do resultado do teste são obtidos da seguinte forma:

$$s_R = \sqrt{\sum_{all m} (\theta_m s_m)^2} \quad (V.9)$$

$$B_R = \sqrt{\sum_{all m} (\theta_m B_m)^2} \quad (V.10)$$



A incerteza global para o resultado do teste é formada da mesma maneira descrita no item V.2.3.

V.2.5 Análise de incerteza antes e depois da medição

A análise de incerteza antes da medição permite que a ação corretiva seja feita previamente, para reduzir incertezas quando elas são grandes demais ou quando a diferença a ser detectada na medição é do mesmo tamanho ou menor que a incerteza prevista. A análise de incerteza antes da medição, identifica a ação corretiva mais

eficiente e o método de medição mais preciso. Ela é baseada em dados e informações existentes, como históricos de calibração, testes anteriores com instrumentação similar, opiniões de especialistas e, se necessário, testes especiais. Com a realização de testes complexos, podem ser encontradas alternativas para uma avaliação anterior ao teste, como diferentes planos de teste, arranjos de instrumentação, procedimentos alternativos de cálculo e variáveis concomitantes. As ações corretivas resultantes desta análise prévia podem incluir:

- a) Melhorias de instrumentação, se as incertezas forem inaceitavelmente altas;
- b) Seleção de um método diferente de medição ou calibração;
- c) Repetição de testes e/ou aumento do tamanho das amostras, se as incertezas aleatórias forem inaceitavelmente altas. O desvio-padrão experimental da média diminui à medida que o número de amostras usado para calcular a média aumenta;
- d) Ao invés de repetir os testes, pode-se estender a duração do teste com o objetivo de calcular a média dos sinais do fluxômetro, resultando em um erro aleatório menor por observação e consequentemente uma menor incerteza aleatória;
- e) Fluxômetros giratórios normalmente geram sinais mostrando um ciclo periódico expresso em um fator numérico. Neste caso, a duração do teste será igualada a um múltiplo inteiro da metade ou do total dos intervalos periódicos, para obter o menor tempo de teste.

A análise de incerteza depois da medição é baseada no dado real da medição. É necessário estabelecer a incerteza final. Isto é usado também para confirmar as estimativas feitas antes da medição e/ou identificar problemas de validade dos dados. Quando há disponibilidade de instrumentação redundante ou métodos de cálculo, as incertezas individuais devem ser comparadas umas com as outras e com a análise feita antes da medição para consistência dos dados. Se os intervalos de incerteza não se sobrepõem, existe algum problema. As incertezas aleatórias obtidas depois da medição devem ser comparadas com as previsões feitas antes da medição.

V.3 Identificação e classificação de fontes elementares de erros da medição

V.3.1 Resumo do procedimento

Faz-se uma lista completa de cada possível fonte de erro para todas as medições que afetam o resultado final do teste. Por conveniência, os mesmos serão agrupados em algumas ou em todas as seguintes categorias:

- a) Calibração;
- b) Aquisição de dados;
- c) Redução de dados;
- d) Erros de método;
- e) Subjetivo ou pessoal.

Dentro de cada categoria podem estar erros sistemáticos e/ou aleatórios.

V.3.2 Erro sistemático versus aleatório

Os erros sistemáticos são aqueles que permanecem constantes no processo de medição para um dado valor de vazão.

Alguns exemplos típicos de erros sistemáticos de medição de vazão são:

- a) Erros de uma calibração única do fluxômetro;
- b) Erros de determinação das constantes na fórmula de um método de medição.

Quando o valor e o sinal de um erro sistemático são conhecidos, considera-se que eles estão corretos (sendo a correção igual em valor, mas com sinal oposto). A imprecisão da correção resulta em uma incerteza sistemática residual.

Os erros aleatórios são aqueles que produzem variação em medições repetidas da mesma quantidade.

Os erros aleatórios típicos associados à medição da vazão são aqueles causados pela leitura imprecisa da escala de um instrumento de medição ou pela difusão do sinal de saída do instrumento. O efeito destes erros na incerteza aleatória pode ser reduzido calculando-se a média dos múltiplos resultados obtidos.

A decisão preliminar para determinar se uma dada fonte elementar contribui nas incertezas sistemática e aleatória, ou em ambas, é feita adotando-se a seguinte recomendação: a incerteza de uma medição deve ser incluída em uma de duas categorias, dependendo de como a incerteza é derivada. O valor de uma incerteza aleatória é estimado por meio de uma análise estatística de medições repetidas, enquanto que uma incerteza sistemática é estimada por métodos não estatísticos.

Esta recomendação evita uma decisão complexa e mantém as estimativas estatísticas separadas das estimativas de decisão, tanto quanto possível. A decisão é preliminar e deve ser revista depois de considerar o processo de medição definido.

V.3.3 Classificação de fontes elementares de erros

As possíveis fontes de erros podem ser divididas arbitrariamente entre três a cinco categorias, já citadas no item V.3.1. O tamanho e a complexidade da análise de incerteza na medição pode conduzir ao uso de quaisquer categorias ou de todas elas.

Por exemplo, a manutenção metrológica, calibração, verificação e certificação de fluxômetros, as medições de vazão e o processamento dos dados, são feitos por pessoas diferentes. Para controlar as possíveis fontes de erros, é aconselhável relacioná-las às etapas de preparação, medição e processamento dos dados.

Em tais casos, é aconselhável classificar as fontes de erros em:

- a) Calibração das fontes de erro;
- b) Erros de medição ou fontes de erro de aquisição de dados;
- c) Erros de processamento de dados ou fontes de erro na redução de dados.

V.3.4 Fontes de erro de calibração

O principal objetivo do processo de calibração é determinar erros sistemáticos, para eliminá-los. Deste modo, o processo de calibração troca a maior incerteza sistemática de um instrumento não calibrado ou mal-calibrado, pela menor combinação da incerteza sistemática do referente instrumento e a incerteza aleatória da comparação. Esta troca de incertezas é fundamental e é a base da idéia de que a incerteza da norma deveria ser substancialmente menor que aquela do instrumento de teste.

V.3.5 Fontes de erro na aquisição de dados

Algumas das fontes de erro na aquisição de dados podem ser: efeitos do ambiente, como temperatura, velocidade média da corrente, turbulência; fatores internos, como freqüência, relação sinal/ruído, parâmetros utilizados na configuração do programa usado para a medição; ou fatores externos, como, movimento do instrumento. Estas incertezas elementares são independentes e não acumulativas.

V.3.6 Fontes de erros na redução de dados

Os erros típicos deste processo originam-se de ajustes de curva e resolução computacional. As incertezas associadas a estas fontes de erro são geralmente desprezíveis.

V.3.7 Fontes de erro de método

Os erros de método são aqueles associados a um procedimento de medição particular e também à incerteza de constantes usadas nos cálculos.

Alguns exemplos deste tipo de fonte de erro são os erros de métodos indiretos de medição de vazão, associados à imprecisão física da relação entre a quantidade medida e a vazão, ou à imprecisão das constantes na relação. Estas imprecisões podem ser devidas, por exemplo, ao fato de que, as condições de fluxo predominantes durante a medição não são idênticas às condições nas quais a calibração foi realizada, ou para as quais um coeficiente de vazão normalizado foi estabelecido. Em determinados métodos de medição de vazão (dispositivos de pressão diferencial, por exemplo), estas fontes de erro que surgem das condições de fluxo são abrangidas pela incerteza associada ao coeficiente de vazão, até onde as condições de instalação prescritas na norma forem satisfeitas; se não forem, a norma não é aplicada. Em outros métodos (método área-velocidade, por exemplo), a incerteza que surge das condições de fluxo é identificada como uma componente da incerteza total; ela deve ser avaliada pelo usuário em cada caso e combinada com outras incertezas elementares.

V.3.8 Fontes subjetivas de erro

As fontes subjetivas de erro são causadas por características pessoais dos operadores que calibraram os fluxômetros, executam as medições e processam os dados. Elas podem incluir erros de leitura e de cálculo.

V.4 Estimativa e apresentação de incertezas elementares

V.4.1 Resumo do procedimento

Obtém-se uma estimativa de cada incerteza elementar. Se os dados estiverem disponíveis para a estimativa do desvio-padrão experimental, classifique a incerteza como aleatória. Caso contrário, ela é classificada como incerteza sistemática.

O objetivo e a duração do teste devem ser revistos, bem como o número de calibrações que afetaram o resultado do teste. É feita a classificação final das incertezas elementares para cada medição. Se um erro aumenta a difusão no resultado da medição em um determinado teste, ele é um erro aleatório; caso contrário, ele é um erro sistemático.

V.4.2 Cálculo do desvio-padrão experimental

Há muitas maneiras de calcular o desvio-padrão experimental:

- a) Se o parâmetro a ser medido puder ser fixado como constante, pode-se usar um número de repetidas medições para avaliar a equação V.2, repetida aqui:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}$$

- b) Se houver M instrumentos redundantes ou M medições redundantes, e o parâmetro a ser medido puder ser fixado como constante, para tomar N leituras repetidas, a seguinte estimativa agrupada do desvio-padrão experimental para leituras individuais, pode ser usada:

$$s_{\text{agrupado}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}{M(N - 1)}} \quad (\text{V.11})$$

Para o desvio-padrão experimental do valor médio do parâmetro, tem-se,

$$s_{\bar{x}} = \frac{s_{\text{agrupado}}}{\sqrt{MN}} \quad (\text{V.12})$$

- c) Se um par de instrumentos, fornecendo medições x_{1i} e x_{2i} que têm o mesmo desvio-padrão experimental, são usados para estimar um parâmetro que não é constante em relação ao tempo, a diferença entre as leituras, Δ , pode ser usada para estimar o desvio-padrão experimental de cada instrumento, individualmente, da seguinte forma:

$$s = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta_i - \bar{\Delta})^2}{2(N-1)} \right]^{1/2} \quad (\text{V.13})$$

Onde:

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Delta_i \quad (\text{V.14})$$

$$\Delta_i = x_{1i} - x_{2i} \quad (\text{V.15})$$

V.4.3 Estimativa da incerteza sistemática

Apesar da aplicação de todas as correções conhecidas para superar imperfeições na calibração, aquisição de dados e processos de redução de dados, alguns erros sistemáticos provavelmente permanecerão. Para determinar o erro sistemático exato na medição, seria necessário comparar o valor verdadeiro e as medições. Porém, como este valor é desconhecido, torna-se necessária a realização de testes especiais ou a utilização de dados existentes, que fornecerão informações sobre a incerteza sistemática.

Algumas vezes, a física do sistema de medição fornece conhecimento do sinal, mas não da magnitude do erro sistemático. Para incertezas elementares, o intervalo de B^+ a B^- , incluirá o zero.

V.4.4 Classificação final da incerteza baseada em um determinado processo de medição

As afirmações de incerteza devem estar relacionadas a um processo de medição bem definido. A classificação final das incertezas em sistemáticas e aleatórias depende da definição do processo de medição. Algumas das considerações a serem feitas, são:

- a) Testes de longo-prazo versus curto-prazo;
- b) Testes comparativos versus absolutos;
- c) Cálculo da média para redução de erros aleatórios.

V.4.4.1 Testes de longo-prazo versus curto-prazo

Os históricos de calibração, obtidos durante ou após o período de testes, podem influenciar a análise de incerteza:

- a) Quando a instrumentação é calibrada somente uma vez, toda a incerteza de calibração é considerada como incerteza sistemática. O erro na correção da calibração é uma constante e não pode aumentar a difusão no resultado do teste. Então, a incerteza de calibração, formada, geralmente, por incertezas sistemáticas e aleatórias consolidadas, é considerada como somente incerteza sistemática, neste caso.
- b) Se o período de teste é longo, o suficiente para que a instrumentação possa ser calibrada várias vezes e/ou vários postos de teste estão envolvidos, o erro aleatório, na hierarquia da calibração, deve ser tratado como contribuição para o desvio-padrão experimental global. Os desvios-padrão experimentais podem ser derivados dos dados de calibração.

V.4.4.2 Testes comparativos versus absolutos

O objetivo de um teste comparativo é determinar, com a menor incerteza na medição possível, o efeito total de uma mudança. O primeiro teste é feito com a configuração padrão ou básica. O segundo é feito com a mudança. A diferença entre os resultados destes testes é uma indicação do efeito da mudança. Contanto que, somente a diferença ou o efeito total entre dois testes seja considerado, todos os erros sistemáticos, sendo fixos, serão desprezados. A incerteza da medição será composta somente de erros aleatórios.

Em um teste comparativo, todos os erros surgem de erros aleatórios na aquisição e na redução de dados. Os erros sistemáticos são, efetivamente, nulos. Como os erros aleatórios de calibração são considerados erros sistemáticos, eles também são nulos.

O resultado do teste é a diferença na taxa de vazão entre dois resultados, r_1 e r_2 , ou seja:

$$\Delta r = r_1 - r_2 \quad (\text{V.16})$$

e

$$s_{\Delta r} = \sqrt{s_{r_1}^2 + s_{r_2}^2} = \sqrt{2 s_{r_1}} \quad (\text{V.17})$$

Onde s_{r_1} é o desvio-padrão experimental do erro aleatório do primeiro teste, $s_{\Delta r}$ é a raiz quadrada da soma dos desvios-padrão experimentais na aquisição e redução de dados, e s_{r_2} é considerado como igual a s_{r_1} .

V.4.4.3 Cálculo da média para redução de erros aleatórios

O resultado do cálculo da média dos testes é geralmente usado para aperfeiçoar a incerteza aleatória. As séries de teste devem ser planejadas cuidadosamente para calcular a média de tantas causas de variação quanto possível, dentro dos limites de custo. O planejamento deve ser ajustado a cada situação. Por exemplo, se a experiência indica que as variações que ocorrem de vez em quando e de equipamento para equipamento são significantes, um planejamento que calcule a média de múltiplos resultados de testes de medição em um equipamento, em um dia, pode produzir uma incerteza aleatória otimista, comparada ao teste de vários equipamentos, cada um montado várias vezes, durante um período de semanas. Os dados históricos são inestimáveis para o estudo destes efeitos. Se a análise de incerteza antes do teste identificar incertezas elementares inaceitavelmente grandes, deve ser considerada a realização de testes especiais para medir os efeitos.

V.5 Combinação e propagação de incertezas

V.5.1 Resumo do procedimento

Para cada medição, devem ser combinados, separadamente, as incertezas sistemáticas elementares e os desvios-padrão elementares pelo método da raiz quadrada do somatório. A incerteza sistemática da medição e o desvio-padrão experimental

devem ser propagados, separadamente, por todos os testes até o resultado final ou por coeficientes de sensibilidade ou, ainda, por incremento finito do programa de redução de dados. Devem ser usadas, constantemente, unidades absolutas ou porcentagens.

V.5.2 Combinação de desvios-padrão experimentais elementares

O desvio-padrão experimental (s) da medição é a raiz quadrada do somatório dos desvios padrões experimentais elementares de todas as fontes, que é:

$$s = \sqrt{\sum_{j=1}^5 \sum_{i=1}^k s_{ij}^2} \quad (\text{V.18})$$

Onde j define a categoria, como (1) calibração, (2) aquisição de dados, (3) redução de dados, (4) erros de métodos e (5) subjetivo ou pessoal, e i define as fontes dentro das categorias.

V.5.3 Combinação de incertezas sistemáticas elementares

Se houver poucas fontes de incertezas sistemáticas elementares, é razoável somá-las para obter as incertezas sistemáticas globais. Na prática, a maioria das medições terá dez, vinte ou mais fontes de erro sistemático. A probabilidade de que todos sejam positivos, ou negativos, e estejam no seu limite é próxima de zero e, portanto, é mais apropriado combiná-los pela raiz quadrada do somatório.

Se uma análise de incerteza na medição identifica quatro ou menos fontes de incerteza sistemática, há uma preocupação de que algumas fontes tenham sido omitidas. A análise deve ser aleatória e uma assistência especializada deve ser contratada para examinar o processo de calibração, o processo de aquisição de dados e o procedimento de redução de dados para fontes adicionais.

Portanto, a incerteza sistemática deve ser usada como a raiz quadrada do somatório das incertezas sistemáticas elementares de todas as fontes.

$$B = \sqrt{\sum_j \sum_i B_{ij}^2} \quad (\text{V.19})$$

A incerteza sistemática para o processo básico de medição é:

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + B_3^2 + B_4^2 + B_5^2} \quad (\text{V.20})$$

Se qualquer uma das incertezas sistemáticas elementares não for simétrica, a equação da raiz quadrada do somatório deve ser usada separadamente para a obtenção de B^+ e B^- .

V.5.4 Propagação de incertezas de medição

Os parâmetros relacionados à vazão raramente são medidos diretamente; geralmente, os mais básicos, como temperatura e pressão, são medidos e o parâmetro relacionado à vazão é calculado em função das medições. A incerteza das medições é propagada para o parâmetro através da função. O efeito da propagação pode ser aproximado pelo método da série de Taylor. É conveniente introduzir o conceito de sensibilidade de um resultado para uma quantidade medida como a incerteza propagada para o resultado devido à incerteza unitária da medição. Há duas formas de obter o coeficiente de sensibilidade:

a) Analiticamente, ou seja, onde existe uma relação matemática conhecida entre o resultado, R , e as quantidades Y_1, Y_2, \dots, Y_K , o coeficiente dimensional de sensibilidade θ_i do resultado R para a quantidade Y_i é obtido por derivação parcial. Assim, se $R = f(Y_1, Y_2, \dots, Y_K)$, então:

$$\theta_i = \frac{\partial R}{\partial Y_i} \quad (\text{V.21})$$

Analogamente, o coeficiente adimensional de sensibilidade relativo, θ'_i , é:

$$\theta'_i = \frac{\partial R / R}{\partial Y_i / Y_i} \quad (\text{V.22})$$

Nesta forma, a sensibilidade é expressa como porcentagem/porcentagem. Ou seja, θ'_i é a porcentagem de mudança em R , causada por 1% de mudança em Y_i . Esta é a forma usada, se as incertezas a serem combinadas, forem expressas

como porcentagens de suas variáveis associadas, em vez de serem expressas como valores absolutos.

b) Numericamente, ou seja, onde não existe relação matemática disponível ou quando a derivação é difícil, podem ser usados incrementos finitos para avaliar θ_i .

Aqui θ_i é dado por:

$$\theta_i = \frac{\Delta R}{\Delta Y_i} \quad (V.23)$$

O resultado é calculado usando-se Y_i para obter R ; e é então recalculado usando-se $Y_i + \Delta Y_i$ para obter $R + \Delta R$. O valor de ΔY_i usado deve ser o menor possível.

Se os desvios-padrão experimentais da medição forem pequenos e as variáveis independentes, o desvio-padrão experimental do resultado R é dado por:

$$s_R = \sqrt{\sum (\theta_i s_{Y_i})^2} \quad (V.24)$$

E a incerteza sistemática por:

$$B_R = \sqrt{\sum (\theta_i B_{Y_i})^2} \quad (V.25)$$

V.6 Cálculo da incerteza

V.6.1 Resumo do procedimento

Um modelo para a combinação das incertezas deve ser selecionado (adição linear ou raiz quadrada do somatório). As incertezas sistemáticas e aleatórias do resultado do teste devem ser combinadas para a obtenção da incerteza global. Para se obter o intervalo de incerteza, o valor da incerteza deve ser somado ao resultado do teste, para o limite superior, e subtraído do resultado, para o limite inferior. Deve haver uma alta probabilidade de que o valor verdadeiro esteja neste intervalo.

V.6.1.1 Intervalos de incerteza

É necessário um único número para expressar um limite razoável para o erro. Assim, dois intervalos de incerteza, com níveis de confiança de 95 e 99%, são recomendados.

V.6.1.2 Intervalos simétricos

O intervalo de incerteza para o caso de incerteza sistemática simétrica é definido como:

$$R - U, R + U \quad (\text{V.26})$$

Onde:

$$U_{ADD} = B + t_{95} s_x \quad (\text{V.7})$$

$$U_{RSS} = \sqrt{B^2 + (t_{95} s_x)^2} \quad (\text{V.8})$$

Se o desvio-padrão experimental for baseado em amostras pequenas, o fator de Student, t_{95} , pode ser tirado da distribuição t , do anexo VI. Para amostras grandes (>30), o t_{95} pode ser substituído por 2 nas equações V.7 e V.8.

Se o resultado do teste é uma média (R) baseada numa amostra de tamanho N , ao invés de um valor individual (R), s/\sqrt{N} deve ser substituído por s .

V.6.1.3 Intervalo assimétrico

Se houver um intervalo assimétrico de incerteza sistemática, a incerteza (U) não é simétrica com relação à medição. O intervalo é definido pelas incertezas sistemáticas positiva (B^+) e negativa (B^-).

V.7 Erros e incerteza na medição de vazão com ADCP

A incerteza da velocidade medida com o ADCP inclui dois tipos de erro: erro aleatório e tendência. O cálculo da média reduz o erro aleatório, mas não a tendência.

Devido ao fato de que o erro aleatório não é correlacionado pulso a pulso, o cálculo da média reduz o desvio-padrão da velocidade pela raiz quadrada do número de pulsos, ou:

$$\sigma \propto N^{1/2} \quad (\text{V.27})$$

Onde N é o número de pulsos acústicos utilizados no cálculo da média.

Uma maneira fácil de ajustar o desvio-padrão ao valor desejado é aumentar ou reduzir o número de pulsos acústicos emitidos por amostra.

O desvio-padrão horizontal da velocidade pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$\sigma_H(V) = \frac{1,5V_a}{\pi} \left[\frac{(R^{-2} - 1)2C \cos \theta}{F_0 D} \right]^{1/2} \quad (\text{V.28})$$

Onde:

V_a = velocidade de ambigüidade;

R = alcance dos feixes acústicos;

C = velocidade do som;

F_0 = freqüência do instrumento;

D = tamanho da célula de profundidade.

As variáveis: geometria dos sensores, freqüência e tamanho da célula de profundidade, são inversamente proporcionais ao desvio-padrão, enquanto que, a variável velocidade de ambigüidade, é diretamente proporcional a ele.

Um ponto importante é o de que o cálculo da média pode reduzir o, relativamente grande, erro aleatório presente em um dado de um único pulso, mas que, depois de uma certa quantidade de cálculo de média, o erro aleatório torna-se menor que a tendência. Neste ponto, é desnecessário fazer mais cálculos, pois eles reduzirão pouco o erro global.

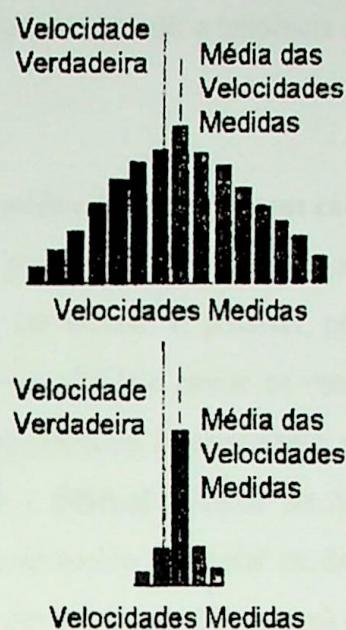


Figura V.1 - Erro na medição de vazão com o ADCP.

V.7.1 Incerteza de curto-prazo versus longo prazo

A incerteza de curto-prazo é definida como o erro em um dado de único pulso do ADCP. Ela é dominada pelo erro aleatório.

A incerteza de longo-prazo é definida como o erro presente após terem sido feitos cálculos de média suficientes para eliminar o erro aleatório. O erro de longo-prazo é o mesmo que a tendência.

V.7.2 Tamanho aproximado do erro aleatório e da tendência

O erro aleatório ou erro de curto-prazo de um único pulso do ADCP pode variar de poucos milímetros por segundo até 0,5 m/s. O tamanho deste erro depende de fatores internos como freqüência do ADCP, tamanho da célula de profundidade, número de pulsos acústicos utilizados no cálculo da média e geometria dos sensores. Os fatores externos incluem turbulência, ondas internas e movimento do ADCP.

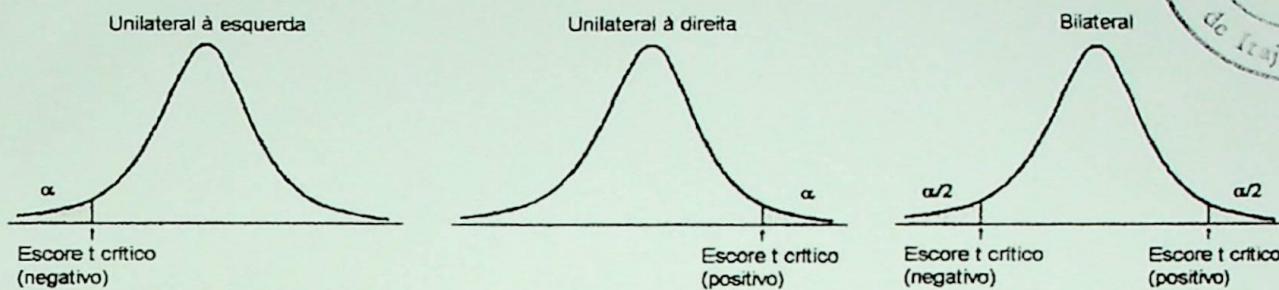
Os erros aleatórios podem ser estimados através do cálculo do desvio-padrão da velocidade. Isto acontece porque os erros aleatórios são independentes de sensor para sensor e porque a velocidade é graduada pelo ADCP para fornecer a grandeza correta dos erros aleatórios da velocidade horizontal.

A tendência é tipicamente menor que 10 mm/s. Ela depende de vários fatores, incluindo temperatura, velocidade média da corrente, relação sinal/ruído, geometria dos

sensores, etc. Ainda não é possível medir a tendência do ADCP e calibrá-lo ou removê-la no pós-processamento.

V.7.3 Cálculo interno da média do ADCP versus cálculo posterior da média

Um sistema ADCP pode calcular a média das amostras internamente, no sistema de aquisição de dados ou em ambos. É possível, por exemplo, calcular a média de amostras de vários pulsos no ADCP e enviar os resultados para um computador que então calcula a média destas amostras. Normalmente, se não houver uma boa razão para fazer o contrário, segundo o Manual Técnico do ADCP Workhorse Rio Grande, a melhor regra é deixar o instrumento converter os dados em coordenadas terrestres e calcular a média dos dados das amostras, antes que eles sejam transmitidos.

ANEXO VI - Distribuição *t* de StudentDistribuição *t*

Graus de Liberdade	α						
	0,005 (unilateral) 0,01 (bilateral)	0,01 (unilateral) 0,02 (bilateral)	0,025 (unilateral) 0,05 (bilateral)	0,05 (unilateral) 0,10 (bilateral)	0,10 (unilateral) 0,20 (bilateral)	0,25 (unilateral) 0,50 (bilateral)	
1	63,657	31,821	12,706	6,314	3,078	1,000	
2	9,925	6,965	4,303	2,920	1,886	0,816	
3	5,841	4,541	3,182	2,353	1,638	0,765	
4	4,604	3,747	2,776	2,132	1,533	0,741	
5	4,032	3,365	2,571	2,015	1,476	0,727	
6	3,707	3,143	2,447	1,943	1,440	0,718	
7	3,500	2,998	2,365	1,895	1,415	0,711	
8	3,355	2,896	2,306	1,860	1,397	0,706	
9	3,250	2,821	2,262	1,833	1,383	0,703	
10	3,169	2,764	2,228	1,812	1,372	0,700	
11	3,106	2,718	2,201	1,796	1,363	0,697	
12	3,054	2,681	2,176	1,782	1,356	0,696	
13	3,012	2,650	2,160	1,771	1,350	0,694	
14	2,977	2,625	2,145	1,761	1,345	0,692	
15	2,947	2,602	2,132	1,753	1,341	0,691	
16	2,921	2,584	2,120	1,746	1,337	0,690	
17	2,898	2,567	2,110	1,740	1,333	0,689	
18	2,878	2,552	2,101	1,734	1,330	0,688	
19	2,861	2,540	2,093	1,729	1,328	0,688	
20	2,845	2,528	2,086	1,725	1,325	0,687	
21	2,831	2,518	2,080	1,721	1,323	0,686	
22	2,189	2,508	2,074	1,717	1,321	0,686	
23	2,807	2,500	2,069	1,714	1,320	0,685	
24	2,797	2,492	2,064	1,711	1,318	0,685	
25	2,787	2,485	2,060	1,708	1,316	0,684	
26	2,779	2,479	2,056	1,706	1,315	0,684	
27	2,771	2,473	2,052	1,703	1,314	0,684	
28	2,763	2,467	2,048	1,701	1,313	0,683	
29	2,756	2,462	2,045	1,699	1,311	0,683	
Grande (z)	2,575	2,327	1,960	1,645	1,282	0,675	

Fonte: Triola, 1998.