

ANÁLISE COMPARATIVA DE CAMPANHAS DE MEDIÇÃO DE DESCARGA LÍQUIDA PELOS MÉTODOS CONVENCIONAL E ACÚSTICO

Júlio Gomes¹ e Irani dos Santos²

Resumo – O presente trabalho representa a continuação do trabalho apresentado por Santos *et al.* (1997) na tentativa de analisar comparativamente diferentes processos de medição de descarga líquida, mais especificamente o método convencional, com a utilização do molinete hidrométrico, e o método acústico, com a utilização do aparelho ADCP (*Acoustic Doppler Current Profile*). Apresenta-se uma comparação entre campanhas de medição de vazão realizadas simultaneamente com a utilização dos dois métodos. Os métodos foram avaliados através da correlação entre as diferenças das vazões medidas pelos dois métodos e características da campanha de medição, considerando-se a análise conjunta das medições. Os resultados da análise conjunta das medições não permitiram explicar as diferenças obtidas em determinadas estações. Procurou-se, então, proceder uma análise mais detalhada das medições que resultaram nas maiores diferenças relativas entre as vazões amostradas pelos métodos convencional e acústico. Na análise detalhada foram avaliadas, a distribuição de velocidades na seção transversal e a representação geométrica da seção transversal. Os resultados obtidos mostraram que a distribuição de velocidades e a representação geométrica da seção transversal explicam as diferenças obtidas para as medições utilizadas na análise detalhada.

Abstract – The present work represents the continuation of the work presented by Santos *et al.* (1997) in the attempt of analyzing different processes of liquid discharge measurement comparatively, more specifically the conventional method, with the use of the current meter, and the acoustic method, with the use of the ADCP (*Acoustic Doppler Current Profile*). It presents a comparison among campaigns of liquid discharge measurements done simultaneously with the use of the two methods. The methods were analyzed through the correlation among the differences of the measured discharges by the two methods and the characteristics of the measurements campaign, considering the analysis of the all measurements together. The results of this kind of analysis didn't allow to explain the differences obtained in certain stations. To analyze these differences, it proceeded a detailed analysis of the measurements that resulted in the largest relative

¹ Professor Adjunto do Centro Universitário Positivo - UnicenP
Av. Nossa Senhora da Aparecida, 174, CEP 80440-000, Curitiba, PR
Fone: (041) 312-1580, Fax: (041) 312-1515
Professor Adjunto da Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUC/PR
e-mail: civil@unicenp.br – jgomes@rla01.pucpr.br

² Pesquisador do Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza
Aluno do Programa de Mestrado em Ciências do Solo - UFPR
Convênio COPEL/UFPR, Caixa Postal 1309, CEP 80001-970, Curitiba, PR
Fone: (041) 366-2020 (r. 6312), Fax: (041) 266-2935
e-mail: irani@cch.copel.br

differences among the measured discharges for the conventional and acoustic methods. In the detailed analysis, the distribution of speeds in the cross section and the geometric representation of the cross section were evaluated. The obtained results showed that the distribution of speeds and the geometric representation of the cross section explain the observed differences in the measurements used in the detailed analysis.

Palavras-chave – hidrometria, medição de vazão, método acústico, ADCP

INTRODUÇÃO

Atualmente, um dos campos que mais tem evoluído em Hidrologia é o de aquisição de dados hidrológicos. Especificamente, no caso de medições de descarga líquida, o método convencional, que utiliza o molinete hidrométrico, têm sido complementado pelo método acústico, que baseado no conceito do efeito *Doppler*, permite a obtenção de descargas líquidas de modo consideravelmente mais rápido e seguro. No presente artigo, são apresentados os resultados de campanhas de medição de vazão pelo método acústico, realizadas pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL) em postos fluviométricos de algumas bacias do estado do Paraná. Os resultados obtidos são analisados em relação a campanhas simultâneas com o método convencional, procurando identificar as explicações para as diferenças entre os valores de vazão amostrados pelos dois métodos.

MÉTODOS PARA MEDIÇÃO DE DESCARGA LÍQUIDA

Método Convencional

O método convencional de medição de descarga líquida, conhecido como área-velocidade, consiste na utilização de um molinete hidrométrico para a determinação da velocidade e na representação da seção transversal, segundo um número adequado de verticais. O número de verticais de medição de velocidades e profundidades varia entre 20 e 25 e depende basicamente da largura do rio na seção de medição.

O número de pontos de medição da velocidade em cada vertical depende do método de medição. Segundo Carvalho (1976), adota-se, por hipótese, que a distribuição de velocidades na vertical apresenta valores nulos próximo ao leito e cresce rapidamente até um valor praticamente constante. Essa distribuição teórica permite um menor número de amostras por vertical.

No presente artigo, as medições convencionais foram obtidas através do método dos “dois pontos” ou método americano, onde mede-se somente dois pontos na vertical: um a 20% da profundidade total e outro a 80%. Para profundidades inferiores a um metro, mede-se apenas um ponto, situado a 60% da profundidade. O posicionamento das verticais foi definido utilizando-se cabo de aço nas seções com até 200 m de largura. Para seções com largura superior a 200 m, o posicionamento das verticais foi obtido através de um distanciômetro.

Para o cálculo da vazão, adotou-se o método da meia-seção, descrito em Carvalho (1976). No referido método, supõe-se que a velocidade média em cada vertical representa a velocidade média em uma área retangular parcial. A largura do retângulo é dada pela distância entre o ponto médio da vertical em análise e da vertical anterior e o ponto médio da vertical em análise e da vertical posterior. A altura do retângulo é dada

pela distância entre a superfície da água e o fundo na vertical em análise, ou seja, é a própria profundidade medida.

Método Acústico

O método acústico fundamenta-se no efeito *Doppler* para, principalmente, determinação do perfil de velocidade da corrente e, por consequência, cálculo da descarga líquida total. As medições pelo método acústico foram realizadas utilizando-se o aparelho ADCP (*Acoustic Doppler Current Profile*). O referido aparelho utiliza técnicas de sensoriamento remoto, através do efeito *Doppler*, para medição de vazão. A velocidade do escoamento é calculada a partir de sinais acústicos enviados pelo aparelho e refletidos pelas partículas sólidas naturalmente presentes na água. Em Gordon (1989), descreve-se o funcionamento básico do ADCP, que consiste em emitir pulsos acústicos ao longo de feixes estreitos em uma frequência conhecida. A diferença das frequências dos sons emitidos e refletidos é proporcional a velocidade relativa entre o barco e as partículas imersas na água.

Como apresentado em Gordon (1989), o som é refletido, primeiramente, pelo zooplâncton e por pequenas partículas de sedimento em suspensão. Na frequência de 1200 kHz, a dimensão dominante das partículas em suspensão é cerca de 0,2 mm. Partículas desta dimensão tendem a se mover junto com a água, fornecendo uma estimativa da velocidade do fluxo. O equipamento básico é composto de: um **transdutor**, responsável pela emissão dos pulsos acústicos e pela detecção do som refletido pelas partículas sólidas; um **processador**, responsável pela coleta e armazenamento das leituras e um **deck box**, responsável pela interface entre o processador, um microcomputador e a alimentação. Pode-se acoplar um microcomputador ao processador para acompanhamento das medições em tempo real.

No processo de medição, a seção transversal é dividida em células de dimensões Δz (profundidade) e ΔL (largura). A dimensão ΔL é função da velocidade do barco. A medida efetuada pelo ADCP é uma média sobre cada elemento de área definido por Δz e ΔL . Gordon (1989), discute as principais fontes de erros das medições de descarga líquida no uso do ADCP, destacando a necessidade de utilização de funções de extrapolação para representação da parcela de vazão junto à superfície, às margens e ao leito do rio.

COMPARAÇÃO ENTRE AS MEDIÇÕES PELO MÉTODO CONVENCIONAL E PELO MÉTODO ACÚSTICO

Em 15 (quinze) estações fluviométricas foram feitas medições simultâneas de vazão pelos métodos convencional, com o uso do molinete hidrométrico, e acústico, com a utilização do ADCP. Em comparação com o conjunto de medições analisado por Santos *et al.* (1997), houve um aumento de 15 para 26 no número de medições simultâneas realizadas e que foram analisadas neste trabalho, apresentadas na Tabela 1. As diferenças

relativas, apresentadas na Tabela 1, foram calculadas adotando-se as vazões pelo método convencional como valores de referência.

Tabela 1 – Medições simultâneas de vazão pelos métodos convencional e acústico (ADCP)

Nº	Código	Nome da Estação	Data	Cota (m)	Vazão (m³/s) (1)	Vazão (m³/s) (2)	Porcentagem medida pelo ADCP	Área (m²) (1)	Profundidade Média (m/s) (1)	Dif. (%) (1)(2)
1	64465000	Tibagi	14/10/96	2,25	361	353	74	458	4,18	-2,4
2	64491000	Barra Rib. das Antas	17/10/96	3,30	421	429	80	322	5,03	2,0
3	64498550	São Gerônimo	18/10/96	2,60	453	442	80	340	5,43	-2,4
4	64506001	Chácara Ana Cláudia	18/10/96	3,22	412	450	83	990	7,10	9,3
5	64655000	Ubá do Sul	22/05/98	1,51	256	261	83	998	7,03	1,9
6	64660500	Vila Rica	22/05/98	1,44	486	449	65	656	2,78	-7,7
7	64675002	Porto Bananeiras	16/10/96	2,14	1055	1165	71	1084	4,20	10,4
8			21/05/98	1,32	636	614	72	921	3,53	-3,5
9	64685000	Porto Paraíso do Norte	16/10/96	3,88	1189	1347	71	935	4,13	13,2
10			21/05/98	2,58	840	838	64	682	2,93	-0,2
11	64795000	Ponte do Piquiri	17/09/97	0,86	131	136	62	566	3,12	4,0
12			19/05/98	2,11	560	547	75	794	4,27	-2,3
13	64799500	Novo Porto 2	16/09/97	1,17	155	171	58	445	2,17	10,1
14			19/05/98	2,42	649	637	70	720	3,44	-1,8
15	64820000	Porto Formosa	16/09/97	1,52	254	249	78	630	4,17	-2,2
16			20/05/98	3,03	810	784	81	871	5,59	-3,2
17	65035000	Porto Amazonas	04/09/96	1,96	120	109	55	170	2,33	-9,5
18	65100000	Rio Negro	05/09/96	3,26	155	147	68	202	3,36	-5,3
19	65175000	Divisa	05/09/96	3,42	252	239	77	333	4,30	-5,2
20	65220000	Fluviópolis	27/06/96	2,16	498	521	67	650	3,05	4,6
21	65255000	Irineópolis	26/06/96	3,89	679	691	70	731	3,92	1,8
22	65310000	União da Vitória	25/06/96	3,72	839	876	75	1110	4,42	4,4
23	65986000	Estreito Novo	20/08/96	3,05	1444	1596	61	2273	2,62	10,5
24	65987000	Porto Capanema	20/08/96	2,68	1454	1457	86	4681	10,60	0,2
25	65993000	Salto Cataratas	22/08/96	1,04	1442	1359	75	3740	4,36	-5,8
26			18/09/97	1,13	1700	1650	76	4006	4,64	-2,9

(1) - Método Convencional; (2) - Método acústico (ADCP)

Destaca-se que nas campanhas de medição realizadas pelo método acústico foram feitas em geral 10 travessias, cada uma resultando em um valor de vazão e profundidade média. Assim, na comparação entre as medições pelo método convencional e as medições pelo método acústico, determinou-se a cota e a vazão médias de cada campanha realizada pelo método acústico. Esta simplificação não introduz erros já que, para as estações analisadas, a variação de cotas durante as medições foi muito pequena.

Para avaliação dos resultados obtidos, procurou-se analisar as diferenças relativas (desvios) entre as vazões medidas pelos métodos convencional e acústico. Três testes estatísticos foram aplicados para verificar: a) a média dos desvios; b) a reta de regressão entre as vazões medidas pelos métodos convencional e acústico; e c) a reta de regressão entre os desvios e alguma determinada característica da medição de vazão.

As variáveis usadas como característica da medição foram: vazão, área da seção transversal, profundidade média, velocidade média e porcentagem da vazão medida pelo ADCP em relação à vazão total. Os valores de vazão, área da seção transversal,

profundidade média e velocidade média utilizados foram os obtidos através das medições pelo método convencional.

No teste para a verificação da média dos desvios, testou-se a hipótese da mesma ser igual a zero com o objetivo de avaliar se, no conjunto das medições simultâneas realizadas, existe alguma tendência do método acústico fornecer valores de vazão maiores ou menores em relação aos resultados obtidos pelo método convencional. Os resultados indicaram que a hipótese de média dos desvios igual a zero é aceita para um nível de significância de 5 %.

No teste para a verificação da correlação entre as vazões medidas pelos métodos convencional e acústico, testou-se as hipóteses do coeficiente angular da reta de regressão ser igual a 1 e do coeficiente linear da reta de regressão ser igual a zero, tomando-se a vazão pelo método acústico como variável dependente e a vazão pelo método convencional como variável independente. O objetivo do teste foi verificar se a relação entre as vazões obtidas nas medições simultâneas pelos métodos convencional e acústico pode ser representada por uma reta a 45° passando pela origem, indicando valores de vazão iguais pelos dois métodos em estudo. Os testes para a análise dos coeficientes angular e linear da reta de regressão foram efetuados como apresentado em Pinto *et al.* (1976).

Os resultados dos testes indicaram que as hipóteses do coeficiente angular da reta de regressão ser igual a 1 e do coeficiente linear da reta de regressão ser igual a zero são aceitas para um nível de significância de 5%. A Figura 1 apresenta a reta de regressão estabelecida entre as vazões obtidas pelos métodos convencional e acústico.

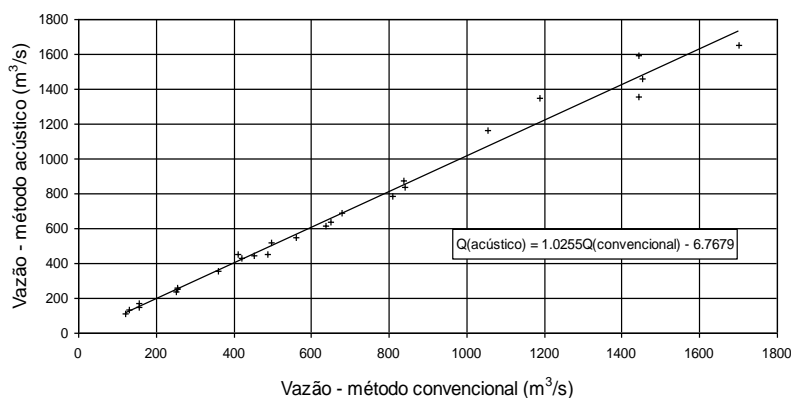


Figura 1 - Comparação entre as vazões obtidas nas campanhas de medição simultânea pelos métodos convencional e acústico

No teste para a verificação da regressão entre os desvios e alguma determinada característica da seção, testou-se as hipóteses dos coeficientes angular e linear da reta de regressão serem iguais a zero, tomando-se o desvio como variável dependente e a característica da medição como variável independente. O objetivo do teste foi verificar se existe algum tipo de correlação positiva ou negativa entre os desvios e alguma das características da medição utilizadas na análise. Os testes para a análise dos coeficientes angular e linear da reta de regressão foram efetuados como apresentado em Pinto *et al.* (1976).

Os resultados dos testes indicaram que as hipóteses dos coeficientes angular e linear da reta de regressão serem iguais a zero são aceitas para um nível de significância de 5%, indicando não haver correlação significativa entre o desvio e alguma das características da medição analisadas. Exceção feita ao coeficiente linear da regressão entre os desvios e a porcentagem da vazão medida pelo ADCP em relação à vazão total, cuja hipótese de igualdade a zero foi aceita somente para um nível de significância de 1%.

Em função dos resultados dos testes estatísticos, verificou-se que as diferenças observadas entre as vazões medidas pelos métodos convencional e acústico não podem ser explicadas pela análise conjunta das medições realizadas. Como consequência, procedeu-se 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.

ANÁLISE DETALHADA DAS MEDIÇÕES SIMULTÂNEAS

A análise detalhada das medições simultâneas foi feita com o objetivo de explicar as diferenças entre as vazões amostradas pelos métodos convencional e acústico, procurando-se analisar cada campanha separadamente. Para a análise detalhada das medições foram selecionadas duas campanhas de medição simultânea, apresentadas na Tabela 2, de acordo com os seguintes critérios:

- 1) Selecionou-se as campanhas de medições simultâneas nas quais as medições pelo método acústico seguiram a mesma seção transversal da medição convencional, ou seja, seguiram a seção definida pelo cabo de aço utilizado para a materialização da seção;
- 2) Considerando as campanhas selecionadas no critério anterior e usando a vazão pelo método convencional como referência, selecionou-se a medição com a maior diferença relativa positiva (vazão-método acústico > vazão-método convencional), e a medição com a maior diferença relativa negativa (vazão-método acústico < vazão-método convencional).

Tabela 2 – Comparativo das medições usadas na análise detalhada das medições simultâneas pelos métodos convencional e acústico

Código	Estação	Data	Vazão (m ³ /s) (1)	Vazão (m ³ /s) (2)	Dif. (%)
64685000	Porto Paraíso do Norte	16/10/96	1189	1337	12,45
65035000	Porto Amazonas	04/09/96	120	111	-7,50

Obs: (1) método convencional; (2) método acústico

Os valores de vazão e diferença relativa apresentados na Tabela 2 diferem em relação aos apresentados na Tabela 1 por serem referentes a apenas uma das travessias realizadas durante a campanha de medição. Como já destacado anteriormente, nas campanhas de medição pelo método acústico são realizadas em geral 10 travessias e os valores apresentados na Tabela 1 representam valores médios para a campanha de medição.

Na análise detalhada das medições simultâneas foram analisados dois fatores: a distribuição de velocidades e a representação geométrica da seção transversal.

Análise da Distribuição de Velocidades na Seção Transversal de Medição

Um dos fatores que podem explicar as diferenças entre as vazões amostradas pelos métodos convencional e acústico é a distribuição de velocidades na seção transversal de medição. Em relação à distribuição de velocidades na seção transversal de medição, dois aspectos fundamentais devem ser considerados:

- 1) a discretização da seção transversal. O método acústico possibilita a amostragem da velocidade em um número maior de pontos do que o método convencional;
- 2) orientação do fluxo na seção transversal. O método acústico, utilizando-se o ADCP, decompõe o vetor velocidade em três componentes principais, duas no plano horizontal e uma no plano vertical, e considera somente a componente normal à seção transversal para o cálculo da vazão. No método convencional, não existe esta possibilidade, exigindo a recomendação de se efetuar a medição em uma seção transversal cujo fluxo seja relativamente bem ordenado, ou seja, as componentes da velocidade não normais à seção transversal podem distorcer as medições efetuadas com o molinete hidrométrico.

As Figuras 2 e 3 apresentam perfis da distribuição de velocidades na seção transversal, fornecidos pelo ADCP, para as medições realizadas em Porto Paraíso do Norte e Porto Amazonas, apresentadas na Tabela 2.

Para avaliação da distribuição de velocidades na seção transversal de medição, procurou-se definir um coeficiente que servisse de parâmetro de comparação entre as duas medições selecionadas para a análise detalhada como descrito a seguir.

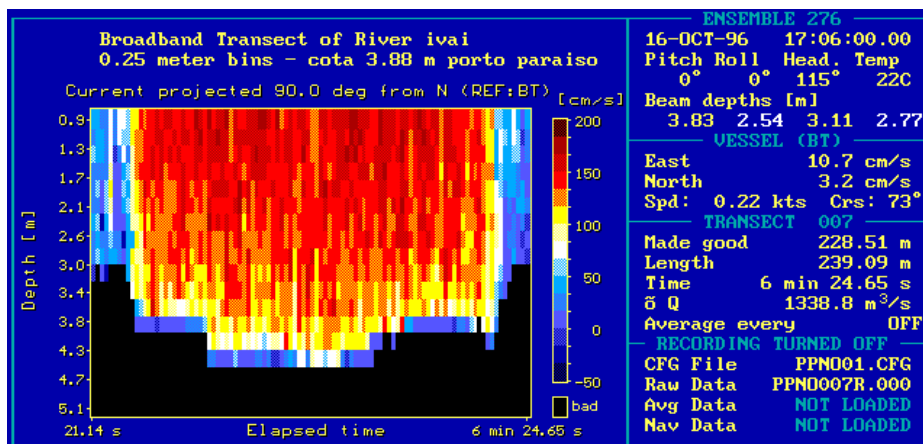


Figura 2 – Distribuição das velocidades da medição acústica em Porto Paraíso do Norte

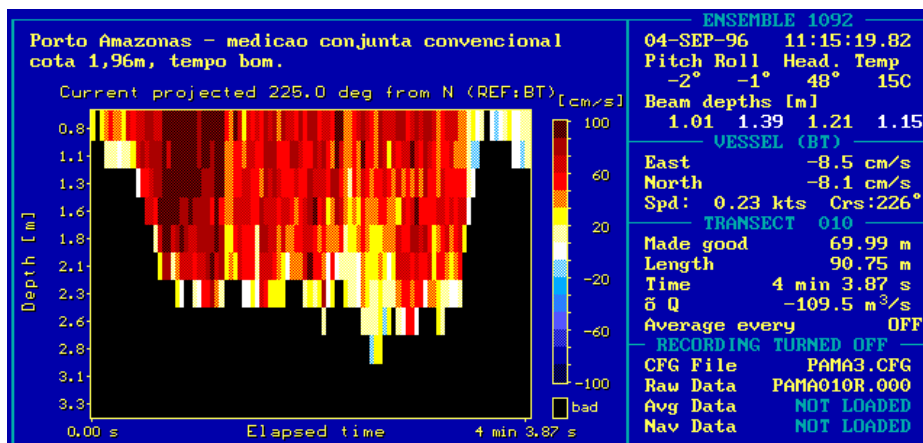


Figura 3 – Distribuição das velocidades da medição acústica em Porto Amazonas

Coefficiente de Distribuição de Velocidades em uma Vertical de Medição

Na medição pelo método acústico em cada vertical de medição são amostrados vários pontos e para cada ponto são associados valores de: profundidade, velocidade e sua orientação (ângulo) no plano xy e velocidade vertical. Portanto, a partir destes valores fornecidos pelo ADCP, pode-se calcular as componentes de velocidade v_x , v_y e v_z para cada ponto amostrado em uma vertical de medição.

Com as componentes da velocidade em cada ponto, calculou-se, para a vertical em análise, uma velocidade média resultante real (VRR) e uma velocidade média resultante virtual (VRV). O cálculo das velocidades médias resultantes real e virtual foi feito

considerando-se o plano xy e o espaço tri-dimensional xyz para considerar a componente vertical da velocidade.

A velocidade média resultante real no plano xy para cada vertical foi calculada como a seguir:

$$VRR(xy) = \sqrt{(\bar{v}_x)^2 + (\bar{v}_y)^2} \quad (1)$$

onde: \bar{v}_x = velocidade média da vertical na direção x;

\bar{v}_y = velocidade média da vertical na direção y;

$VRR(xy)$ = velocidade média real resultante no plano xy.

A velocidade média resultante virtual no plano xy para cada vertical foi calculada sob a hipótese de que as velocidades resultantes no plano xy em todos os pontos da vertical de medição tivessem a mesma orientação (fluxo ordenado). Portanto, a velocidade média resultante virtual no plano xy foi calculada como:

$$VRV(xy) = \frac{\sum_{i=1}^{npv} v(xy)_i}{npv} \quad (2)$$

onde: $v(xy)_i$ = velocidade resultante no plano xy no ponto i da vertical de medição;

npv = número de pontos amostrados na vertical

Para cada vertical em análise, calculou-se um coeficiente de velocidades (CV) para o plano xy, definido por:

$$CV(xy) = \frac{VRR(xy)}{VRV(xy)} \quad (3)$$

onde: $VRR(xy)$ = velocidade média resultante real no plano xy;

$VRV(xy)$ = velocidade média resultante virtual no plano xy;

$CV(xy)$ = coeficiente de velocidade no plano xy para a vertical em análise.

O valor do coeficiente CV (xy), calculado pela Equação 3, indica o grau de ordenamento do fluxo na vertical em análise, considerando-se o plano xy. Quanto mais próximo de 1, mais ordenado o fluxo do escoamento (velocidades nos pontos de amostragem da vertical têm a mesma orientação).

O mesmo tipo de análise foi realizada para levar em consideração a componente vertical (v_z) da velocidade nos pontos de amostragem da vertical. A velocidade média resultante real no espaço xyz para cada vertical foi calculada como a seguir:

$$VRR(xyz) = \sqrt{(\bar{v}_x)^2 + (\bar{v}_y)^2 + (\bar{v}_z)^2} \quad (4)$$

onde: \bar{v}_x = velocidade média da vertical na direção x;

\bar{v}_y = velocidade média da vertical na direção y;

\bar{v}_z = velocidade média da vertical na direção z;

$VRR(xyz)$ = velocidade média real resultante no espaço xyz.

A velocidade média resultante virtual no espaço xyz para cada vertical foi calculada somando-se a velocidade média resultante virtual no plano xy com a velocidade média da vertical na direção z. Portanto, a velocidade média resultante virtual foi calculada como:

$$VRV(xyz) = VRV(xy) + \bar{v}_z \quad (5)$$

onde: \bar{v}_z = velocidade média da vertical na direção z;

$VRV(xy)$ = velocidade média resultante virtual no plano xy;

$VRV(xyz)$ = velocidade média resultante virtual no espaço xyz;

Para cada vertical em análise, calculou-se um coeficiente de velocidades (CV) para o espaço xyz, definido por:

$$CV(xyz) = \frac{VRR(xyz)}{VRV(xyz)} \quad (6)$$

onde: $VRR(xyz)$ = velocidade média resultante real no espaço xyz;

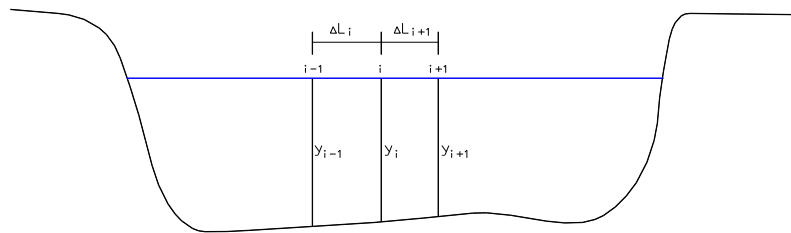
$VRV(xyz)$ = velocidade média resultante virtual no espaço xyz;

$CV(xyz)$ = coeficiente de velocidade no espaço xyz para a vertical em análise.

O valor do coeficiente $CV(xyz)$ também indica o grau de ordenamento do fluxo na vertical em análise, considerando-se o espaço xyz, ou seja, levando em consideração as componentes verticais de velocidades (fluxos ascendente e descendente). Novamente, quanto mais próximo de 1, mais ordenado o fluxo do escoamento.

Cálculo dos Coeficientes $CV(xy)$ e $CV(xyz)$ para a Seção Transversal

O procedimento descrito na seção anterior foi adotado para obter os coeficientes $CV(xy)$, Equações 1 a 3, e $CV(xyz)$, Equações 4 a 6, e cujos valores foram utilizados para caracterizar o grau de ordenamento do fluxo em uma vertical amostrada pelo método acústico. A partir dos coeficientes $CV(xy)$ e $CV(xyz)$ procurou-se definir um coeficiente CS que caracterizasse o grau de ordenamento do fluxo para a seção transversal como um todo. A Figura 4 apresenta uma seção transversal genérica e as grandezas usadas no cálculo de $CS(xy)$ e $CS(xyz)$.



Fi

gura 4 – Esquema genérico de uma seção transversal de medição

Como na análise anterior, obteve-se valores para CS considerando-se o plano xy e o espaço xyz. Para ambos os casos, foram adotados 5 procedimentos distintos para cálculo do CS:

- 1) Média aritmética dos valores de CV

$$CS = \frac{\sum_{i=1}^{nv} CV_i}{nv} \quad (7)$$

onde: CV = coeficiente de velocidade no plano xy (ou no espaço xyz) para a vertical i;

nv = número de verticais amostradas;

CS = coeficiente de velocidade no plano xy (ou no espaço xyz) para a seção transversal

- 2) Média dos valores de CV ponderados pela profundidade

$$CS = \frac{\sum_{i=1}^{nv} y_i CV_i}{\sum_{i=1}^{nv} y_i} \quad (8)$$

onde: y_i = profundidade na vertical i e as demais grandezas como definidas na Equação (7).

- 3) Média dos valores de CV ponderados pela distância entre verticais

$$CS = \frac{\sum_{i=1}^{nv} \frac{(\Delta L_i + \Delta L_{i+1})}{2} CV_i}{\sum_{i=1}^{nv} \frac{(\Delta L_i + \Delta L_{i+1})}{2}} \quad (9)$$

onde: ΔL_i = distância entre as verticais (i-1) e (i) e demais grandezas como definidas na Equação 7

4) Média dos valores de Cv ponderados pelo produto da profundidade e distância entre verticais

$$CS = \frac{\sum_{i=1}^{nv} \frac{(\Delta L_i + \Delta L_{i+1})}{2} y_i CV_i}{\sum_{i=1}^{nv} \frac{(\Delta L_i + \Delta L_{i+1})}{2} y_i} \quad (10)$$

5) Média dos valores de CV ponderados pelo produto da profundidade, distância entre verticais e velocidade média resultante real na vertical i

$$CS = \frac{\sum_{i=1}^{nv} \frac{(\Delta L_i + \Delta L_{i+1})}{2} y_i VRR_i CV_i}{\sum_{i=1}^{nv} \frac{(\Delta L_i + \Delta L_{i+1})}{2} y_i VRR_i} \quad (11)$$

onde: VRR_i = velocidade média resultante real no espaço xyz na vertical i e demais grandezas como definidas nas Equações (7) a (9)

Para as duas medições selecionadas para a análise detalhada, apresentadas na Tabela 2, foram calculados os coeficientes CS(xy) e CS(xyz) pelos cinco procedimentos apresentados, Equações 7 a 11, e os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Valores de CS(xy) para as medições utilizadas na análise detalhada

Estação	Porto Paraíso do Norte	Porto Amazonas
Vazão (método convencional)	1189	120
Vazão (método acústico)	1337	111
Número de verticais	108	79
Número total de pontos	1203	397
CS(xy) – procedimento 01	0,967	0,980
CS(xy) – procedimento 02	0,975	0,979
CS(xy) – procedimento 03	0,992	0,979
CS(xy) – procedimento 04	0,993	0,977
CS(xy) – procedimento 05	0,997	0,981

Analisando-se os valores de CS(xy) apresentados na Tabela 3, principalmente os valores fornecidos pelos procedimentos 4 (ponderação por dimensão de área) e 5 (ponderação por dimensão de vazão), verifica-se que o fluxo é melhor ordenado para a medição em Porto Paraíso do Norte em comparação à medição em Porto Amazonas, a diferença porém é relativamente pequena.

Tabela 4 – Valores de CS(xyz) para as medições utilizadas na análise detalhada

Estação	Porto Paraíso do Norte	Porto Amazonas
Vazão (método convencional)	1189	120
Vazão (método acústico)	1337	111
Número de verticais	108	79
Número total de pontos	1203	397
CS(xy) – procedimento 01	0,934	0,879
CS(xy) – procedimento 02	0,943	0,826
CS(xy) – procedimento 03	0,963	0,877
CS(xy) – procedimento 04	0,964	0,874
CS(xy) – procedimento 05	0,968	0,883

Analisando-se os valores de CS(xyz) apresentados na Tabela 4, verifica-se, novamente, que o fluxo é melhor ordenado para a medição em Porto Paraíso do Norte em relação à medição em Porto Amazonas. Comparando-se os valores de CS(xy) e CS(xyz), apresentados nas Tabelas 3 e 4, verifica-se que as maiores diferenças de CS calculadas

para as duas medições analisadas são para os valores de CS(xyz) indicando uma maior influência das componentes verticais de velocidade.

É importante destacar que a medição em Porto Amazonas, que apresentou os menores valores de CS(xyz), resultou em valor de vazão pelo método acústico menor do que a vazão obtida pelo método convencional. Ressalta-se a possível influência de componentes não normais à seção transversal de medição sobre as velocidades amostradas pelo molinete. Portanto, as diferenças relativas negativas, onde a vazão pelo método acústico é menor do que a vazão pelo método convencional, podem em parte ser explicadas pela distribuição de velocidades na seção transversal.

Análise da Representação Geométrica da Seção Transversal

Na análise da representação geométrica da seção transversal, utilizou-se a área da seção medida pelos dois métodos como termo de comparação. A área foi calculada pelo método da meia seção, conforme descrito no início desse trabalho. Para a medição acústica, a profundidade da vertical foi considerada como sendo a média dos quatro sensores do ADCP e a distância como sendo a distância corrigida (made good), também fornecida pelo ADCP.

Os resultados das áreas pelos dois métodos de medição constam da Tabela 5. As diferenças das áreas estão no mesmo sentido das diferenças apresentadas pela vazão e, apesar de serem menores, podem explicar as diferenças da vazão.

Tabela 5 – Comparativo das áreas das medições analisadas

Código	Estação	Área da seção (m ²) (1)	Área da seção (m ²) (2)	Dif. Área (%)	Dif. Vazão (%)
64685000	Porto Paraíso do Norte	935.84	984.48	5.20	12,45
65035000	Porto Amazonas	169.85	164.98	-2.86	-7,50

Obs: (1) método convencional; (2) método acústico

As Figuras 5 e 7 mostram a trajetória da medição pelo método acústico e as Figuras 6 e 8 mostram uma comparação dos perfil da seções transversais determinadas pelos dois métodos.

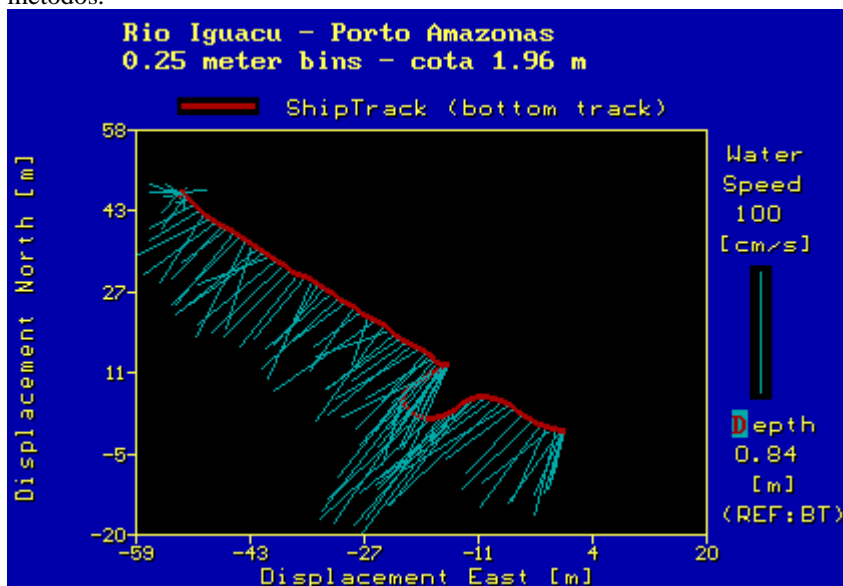


Figura 5 – Trajetória do barco na medição acústica em Porto Amazonas

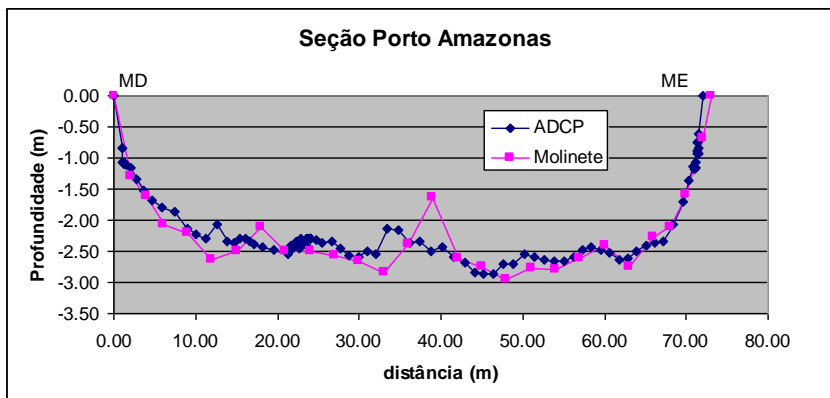


Figura 6 – Seção transversal determinada nas medições acústica e convencional em Porto Amazonas

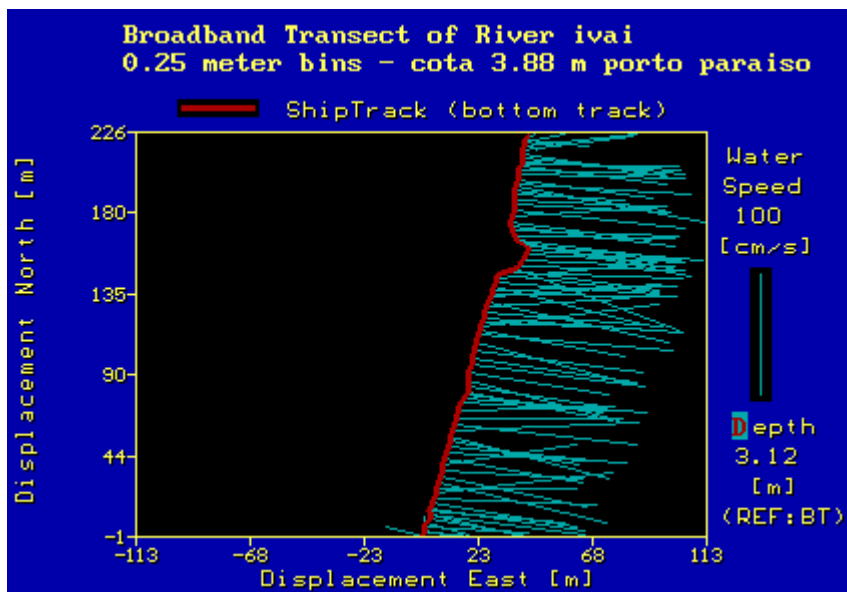


Figura 7 – Trajetória do barco na medição acústica em Porto Paraíso do Norte

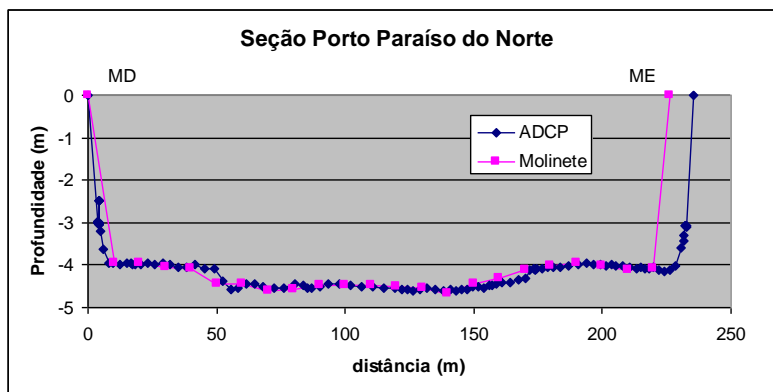


Figura 8 – Seção transversal determinada nas medições acústica e convencional em Porto Paraíso do Norte

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise conjunta das medições simultâneas não permitiu identificar nenhuma tendenciosidade na comparação dos valores de vazão amostrados pelos dois métodos. A análise detalhada das medições, que apresentaram as maiores diferenças relativas entre as vazões pelos métodos convencional e acústico, permitiu identificar a distribuição de velocidades e a representação geométrica da seção transversal como causas que explicam as diferenças entre os valores de vazão amostrados pelos dois métodos, considerando-se as medições utilizadas na análise detalhada. Recomenda-se a continuidade da realização de campanhas de medição simultânea para permitir um conjunto maior de medições a serem analisadas, inclusive em outras estações fluviométricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CARVALHO, N. O. Medição de descarga líquida com molinete. In: Saneamento. Rio de Janeiro, out./dez. 1976. p. 260-266.
- GORDON, R. L. Acoustic measurement of river discharge. In: Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 115, No. 7, July, 1989. p. 925-936.
- PINTO, N. L. DE S., HOLTZ, A. C. T., MARTINS, J. A., GOMIDE, F. L. S. Hidrologia básica. São Paulo : Editora Blücher, 1976. 278p.
- SANTOS, I. dos; GOMES, J.; BUBA, H. Medições de descarga líquida: método convencional x método acústico. Comparação dos resultados. XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vitória. ABRH. Anais – Volume I : p.369-378. Nov. 1997.