A ADEQUAÇÃO DO ADCP A PEQUENOS E MÉDIOS CURSOS D'ÁGUA

Geraldo Lúcio Tiago Filho[1] e Geysa Tiburcio Caetano [2]

Resumo - A implantação e operacionalização de uma rede hidrológica prescindem da instalação de uma rede de postos fluviométricos que possam gerar dados confiáveis obtidos de uma "curva-chave", que é levantada através de uma série de medidas de vazões efetuadas na seção do posto. Normalmente, para medição dessas vazões, utiliza-se de molinetes e outros tipos de fluxômetros. São métodos bastante conhecidos e aplicados, entretanto, na execução demandam tempo, conhecimentos e habilidades técnicas, sem os quais podem gerar dados que não condizem com o real.

Uma maneira de acelerar o processo é o uso de métodos e dispositivos automatizados, como é o caso do Acoustic Doppler Current Profiler – ADCP, que mede a vazão automaticamente por meio do fenômeno acústico denominado de efeito Doppler. Entretanto, o seu uso está restrito aos grandes cursos d'água.

O presente trabalho faz uma descrição do princípio de funcionamento do ADCP e compara os resultados de medidas de vazões, obtidas com este equipamento e com os métodos convencionais.

Abstract – The implementation and operation of a hydrological data net need installation of a net of river gauge stations that can generate reliable data obtained by means of a "stage discharge curve", that is attained through a series of discharge measurements carried out in the station cross section. Usually, propeller flowmeter and other kinds of flowmeters are used to measure these flows. These are widespread and well-known methods, however, they require time, knowledge and technical skills to be performed, and the absence of these factors may generate data that are not in accordance with reality.

A way to accelerate the process is the use of methods and automatized devices, such as the Acoustic Doppler Current Profiler – ADCP, that measures the discharge automatically by means of an acoustic phenomenon called Doppler effect. However, its use is restricted to large rivers.

[1] [1] Escola Federal de Engenharia de Itajubá – EFEI; LHPCH; Av. BPS, 1303; Cep: 37500-903; Itajubá; MG; Brasil; Tel: 35 3629-1157; Fax: 35 3629-1265; e-mail: tiago@iem.efei.br

[2] Escola Federal de Engenharia de Itajubá – EFEI; LHPCH; Av. BPS, 1303; Cep: 37500-903; Itajubá; MG; Brasil; Tel: 35 3629-1157; Fax: 35 3629-1265; e-mail: geysa@cpd.efei.br

The present work makes a description of the ADCP operational principles and compares the results of the discharge measurements obtained with this equipment with the ones obtained by using the conventional methods.

Palavras-chave - hidrometria, ADCP

INTRODUÇÃO

Os Brasil é um país com abundantes recursos hídricos, desigualmente distribuídos em seu território, tendo sua maior concentração na região Amazônica. Entretanto, no restante do país existe um considerável potencial hídrico distribuído em grandes bacias, onde os rios principais são formados por inúmeros pequenos e médios cursos d'água, cuja preservação é primordial para a perenização dos recursos, principalmente onde a água é mais escassa. A otimização dos sistemas de aproveitamento depende de planejamento, de estudos e principalmente do conhecimento das reais características das bacias. Por isso, é muito importante o estudo de postos fluviométricos, cujas curvas-chave são levantadas através de medições periódicas nas seções. As vazões são obtidas, geralmente, por métodos convencionais, que embora bastante conhecidos e aplicados, necessitam de tempo e conhecimentos técnicos para sua execução.

O uso de métodos e dispositivos automatizados, como por efeito Doppler, tal como o Acoustic Doppler Current Profiler – ADCP, torna-se interessante, visto que o processo de medição de vazão passa a ser automático e, portanto, muito mais ágil.

O trabalho tem o objetivo de comparar o método convencional dos molinetes e o método acústico do ADCP, com a intenção de verificar a confiabilidade do ADCP para uso em pequenos e médios cursos d'água.

O ADCP

O ADCP, Acoustic Doppler Current Profiler, ou, Perfilador Doppler-Acústico de Corrente, é um instrumento utilizado para medir a vazão dos cursos d'água através do efeito Doppler. Ele também pode ser utilizado para medir o seu movimento com relação ao fundo do rio e a distribuição dos sedimentos em suspensão na seção de medição.

O 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 movimentos e para fornecer informação sobre a velocidade dos mesmos, através da medição da diferença de freqüência entre o som emitido e o som refletido.

Princípio de Funcionamento

O instrumento é instalado na lateral de um barco, ou inserido em flutuadores do tipo catamaram, bóia ou prancha de “bodyboard”, de maneira que seus quatro emissores/receptores de ondas acústicas permaneçam imersos na água. Figura 1. Dando-se a partida, o instrumento passa a emitir ondas sonoras que são transmitidas através da água. As partículas de sólidos em suspensão, transportadas pela corrente de água, refletem o som de volta para o instrumento que, através de seus sensores, percebe o eco. Os tempos de retorno das ondas acústicas em cada feixe permitem ao instrumento identificar as diferentes profundidades da seção. As diferenças nas freqüências entre as ondas emitidas e as recebidas em cada sensor, que é o efeito Doppler, permitem ao instrumento determinar as componentes das velocidades respectivas às profundidades. Figura 2.

Supõe-se que o material em suspensão se desloca na mesma velocidade da corrente de água. Como 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 3.

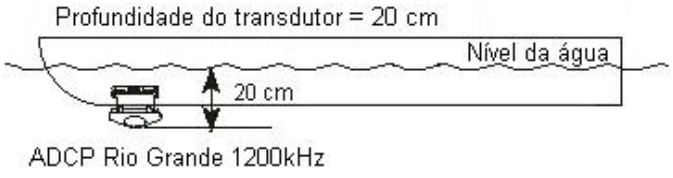

Figura 1 - ADCP instalado na lateral do barco.

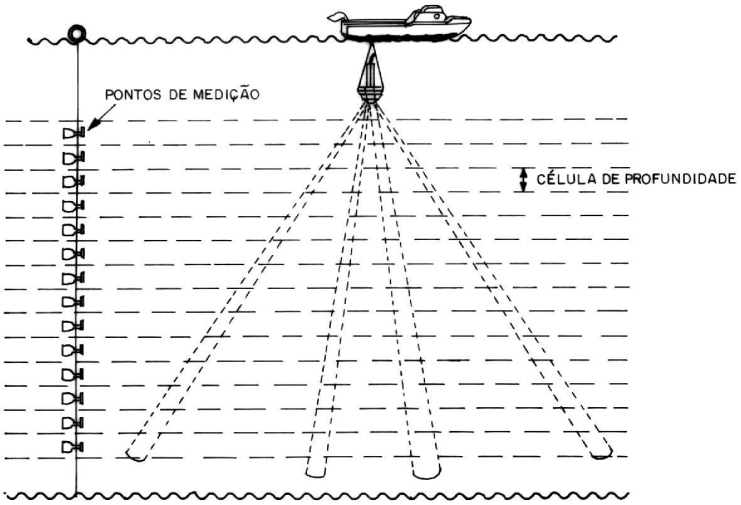

Figura 2 - Técnica típica de uso do ADCP.

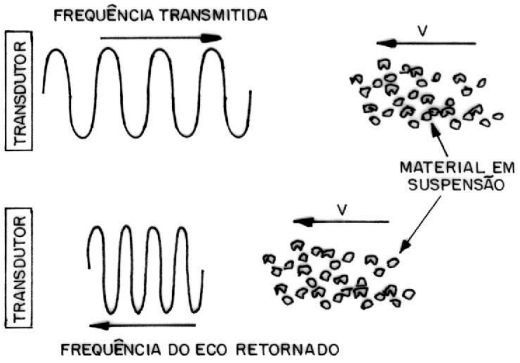

Figura 3 - Mudança na freqüência causada pelo efeito Doppler.

Procedimentos para medição de vazão com o ADCP

O primeiro passo para o uso do ADCP é a escolha de uma seção transversal adequada. Seções muito rasas devem ser evitadas e o início da medição não pode ser muito próximo das margens. O instrumento, por ter que ficar imerso na água, não pode medir as velocidades próximas à superfície. Para haver tempo de emissão e recepção das ondas sonoras cria-se uma faixa “cega” de uma largura aproximada de 25 cm logo abaixo dos sensores. No fundo da seção, por haver interação da água com o solo, havendo transporte de sedimentos, também ocorre uma faixa “cega”. Nas regiões próximas às margens, também por não haver espaço suficiente para que as ondas sonoras se desloquem adequadamente, podem ocorrer ecos secundários que provocariam “ruídos” nos sinais

recebidos pelos sensores, por isso, o procedimento de medição exige que o início e o final da mesma se dêem a uma determinada distância das margens. Figura 4. Fornecidas as condições de contorno: profundidade de imersão dos sensores, distâncias das margens aos pontos inicial e final de medição da vazão e formas das mesmas, o instrumento, através de extrapolação, determina a vazão em toda a seção ao final da travessia.

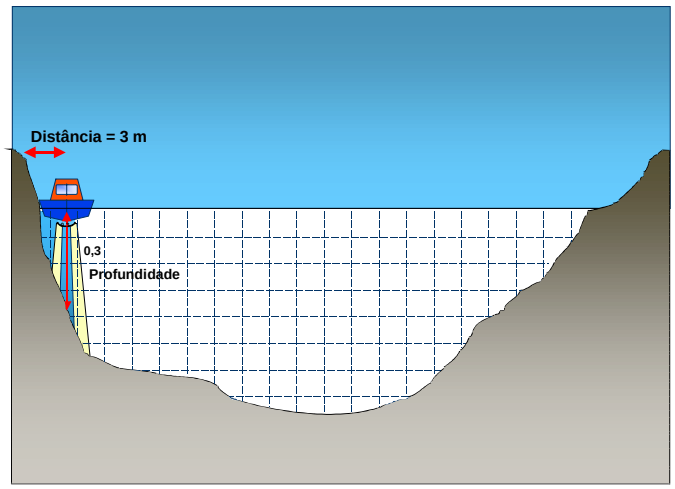

Figura 4 - Seção de medida do ADCP.

O início da operação se dá pelo reconhecimento da seção. Isto pode ser feito com o uso de um ecobatímetro como ferramenta de reconhecimento. Normalmente, usa-se o próprio ADCP no reconhecimento da seção. Se houver movimento de sedimento de fundo ou a suspeita do movimento, serão necessárias duas travessias (ida e volta) para o reconhecimento da seção. A medição é iniciada com o posicionamento do barco tão próximo de uma das margens quanto o instrumento permita. A distância entre o barco e a margem é medida com o uso de uma trena, um clinômetro, etc. Inicia-se a operação dando-se início ao “software” no módulo de aquisição e inicia-se a travessia da seção do rio com o barco, informando-se a distância inicial e o formato aproximado das seções próximas das margens. Durante a travessia, a trajetória do barco, a seção do curso d’água e as velocidades, em uma escala de cores, de cada subseção são exibidas seqüencialmente na tela do computador. Ao final da travessia, o barco é posicionado tão próximo quanto possível da outra margem. O “software” é informado pelo operador de que a medição terminou e a distância até a outra margem é determinada. O “software”, então, pede ao operador para digitar a distância final até a margem e um resumo da medição é mostrado na tela do computador. Figura 5. 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.

Fazem-se várias medições na mesma seção. A vazão final será o valor médio da série de medições. Para a obtenção de valores adequados, é recomendado um mínimo de quatro medições, em uma mesma série.

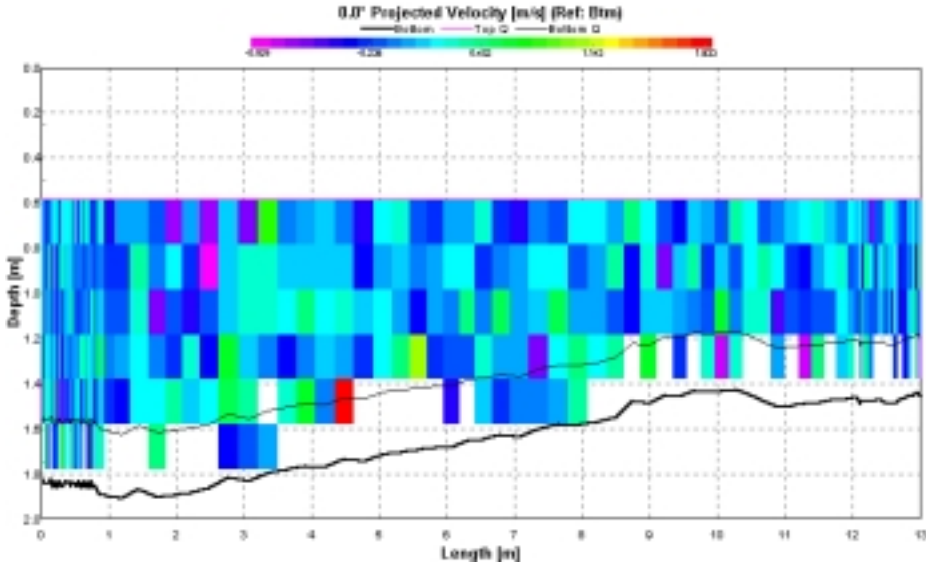

Figura 5 - Gráfico com distribuição de velocidades da medição nº 9, tabela 1, obtido através do software WinRiver.

ANÁLISE TEÓRICA

Um dos primeiros algoritmos para o processamento da vazão via ADCP, a partir do perfil de velocidade da água e dados de trajetória de fundo, foi desenvolvido por K.L. Deines e, segundo Simpson e Oltmann (1993), foi testado em 1982, numa seção do rio Mississipi. Uma das vantagens 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. Figura 6.

Equações

A vazão através de uma superfície arbitrária *s* de um rio é dada pela seguinte equação geral:

$$Q_t = \int_s \overline{V_f} \cdot \overline{n}\, ds \qquad (1)$$

onde: Q_t = descarga total do rio; $\overline{V_f}$ = vetor velocidade média da água; $\overline{n}$ = vetor unidade normal a ds para um ponto genérico; e ds = diferencial de área.

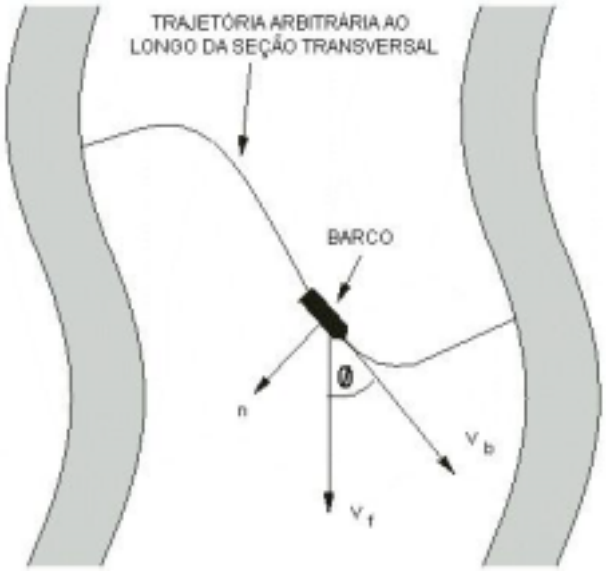

Figura 6 – Medição de vazão em uma seção arbitrária de um rio.

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, a equação 1 é reformulada da seguinte forma, mais conveniente, (de Christensen e Herrick, 1982):

$$Q_t = \int_0^T \int_0^d (\overline{V_f} \times \overline{V_b}) \cdot \overline{k} \; dz \; dt \qquad (2)$$

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, e dt = diferencial de tempo.

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

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

e então

$$(\overline{V_f} \times \overline{V_b}) \cdot \bar{\bar{k}} = a_1\, b_2 - a_2\, b_1, \qquad (3)$$

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.

Assumimos $f = a_1\, b_2 - a_2\, b_1$.

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

$$Q_m = \sum_{i=1}^{N_s} [\int_0^{d_i} f_i \; dz] \; t_i \qquad (4)$$

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

Verificação da adequação do ADCP às pequenas seções

Em função das limitações descritas anteriormente, impostas pelo seu modo operante, o uso do ADCP normalmente fica restrito aos grandes curso d'água, onde tem-se tornado corriqueiro. Para este tipo de serviço, não pairam dúvidas quanto à versatilidade e precisão do instrumento, principalmente quando a seção é profunda e extensa como o são as dos rios Amazonas e Madeira, por exemplo. Nestes rios, já foram feitas inúmeras medições, onde as campanhas de acompanhamento das estações fluviométricas abandonaram os tradicionais molinetes e têm utilizado quase exclusivamente o ADCP. Nestas seções, para medição de vazão, são utilizados instrumentos de freqüências mais baixas, de 300 a 600 kHz. Entretanto, para pequenos e médios cursos d'água, seu uso ainda não está difundido, uma vez que as zonas "cegas" impõem restrições ao instrumento quando em seções muito rasas ou estreitas.

O ADCP operando em um médio curso d'água

Com o objetivo de verificar a adequação do instrumento aos pequenos e médios cursos d'água, em parceria com a ANEEL e a OMM, disponibilizou-se um ADCP de 1200 kHz, do tipo WorkHorse, e efetuou-se várias medições de vazão em uma estação fluviométrica do Rio Sapucaí, localizada em Itajubá, Minas Gerais, comparando-se os resultados com os que foram obtidos na curva-chave da mesma. Os resultados são mostrados na tabela 1.

O ADCP em canais

No caso de canais com margens verticais, os sinais do ADCP que atingem a margem, retornam 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.

Foram realizados testes com o ADCP no canal de adução da PCH Curucaca, em Guarapuava, Paraná, por ocasião dos testes de comissionamento dos grupos geradores. Nesta central a seção do canal é trapezoidal, com, aproximadamente, 21 m de fundo, 27 m de largura ao nível da água, e 9 m de profundidade. A vazão medida pelo ADCP foi comparada com as medidas obtidas por um ultra-som instalado no conduto forçado da central. Os resultados obtidos são mostrados na tabela 2.

Tabela 1 - Comparação entre os dados obtidos com o ADCP e a curva-chave

Nº	Data	Cota (cm)	Vazão curva-chave (m^3/s)	Vazão ADCP (m^3/s)	Modo de operação	Tamanho da célula de profundidade	Desvio relativo (%)
1	05/12/00	112	15,72	16,28	1	25	3,44
2	27/12/00	170	30,41	32,68	1	25	6,95
3	27/12/00	176	32,19	31,07	1	20	-3,60
4	28/12/00	190	36,56	33,68	1	20	-8,55
5	30/12/00	165	28,95	29,42	1	20	1,60
6	30/12/00	165	28,95	29,80	1	35	2,85
7	30/12/00	165	28,95	29,88	1	15	3,11
8	05/01/01	174	31,59	32,84	1	20	3,81
9	09/01/01	116	16,58	18,12	1	20	8,50
10	11/01/01	123	18,14	18,54	1	20	2,16
11	17/01/01	105	14,27	14,01	1	20	-1,86
12	17/01/01	105	14,27	14,02	1	25	-1,78
13	19/01/01	100	13,27	13,62	1	20	2,57
14	19/01/01	100	13,27	14,75	8	20	10,03
15	23/01/01	104	14,06	14,79	1	20	4,94
16	23/01/01	104	14,06	15,23	1	10	7,68
17	25/01/01	139	21,97	22,55	1	20	2,57
18	03/05/01	85	10,49	10,20	1	20	-2,84

Tabela 2 - Comparação entre os dados obtidos com o ADCP e o Ultra-som

Nº	Potência (kW)	Vazão ADCP (m^3/s)	Vazão ultra-som (m^3/s)	Desvio relativo (%)
1	3.740	6,71	6,71	0,00
2	2.450	5,10	4,13	19,02
3	1.620	3,40	3,16	7,06
4	1.040	2,09	2,29	-9,57

RESULTADOS OBTIDOS

Ao todo, foram realizadas na estação fluviométrica do Rio Sapucaí,18 medições, mostradas na tabela 1, nas quais os valores de vazões adquiridos pelo ADCP foram comparados com os obtidos da curva-chave local. Para análise destes dados foram aplicados dois testes estatísticos.

Inicialmente, foi testada, para um nível de significância de 5%, a afirmação de que a média dos desvios relativos entre as vazões do método do ADCP e da curva-chave era igual a zero. O segundo teste valeu-se da hipótese de que os valores de vazões dos dois métodos não estavam correlacionados e a relação entre eles não podia ser representada por uma reta a 45º passando pela origem, indicando valores diferentes para os dois métodos. E, também, para um nível de significância de 5%, foi testada a afirmação de que o coeficiente de correlação da reta de regressão era igual a 0.

Para o teste que envolvia a média dos desvios, a hipótese inicial foi verificada, o que significa dizer que, para um nível de significância de 5%, não há evidências suficientes para rejeitar a afirmação, ou seja, a média dos desvios se aproxima de zero. No teste da reta de regressão foi indicado, para o mesmo nível de significância, que a hipótese inicial foi rejeitada. O coeficiente de correlação calculado para a reta de regressão foi de 0,991, o que significa que existe uma forte correlação entre as duas amostras analisadas. O ângulo de inclinação da reta de regressão é de 45,4º, o que indica uma grande aproximação entre os valores obtidos pelos dois métodos. Figura 7.

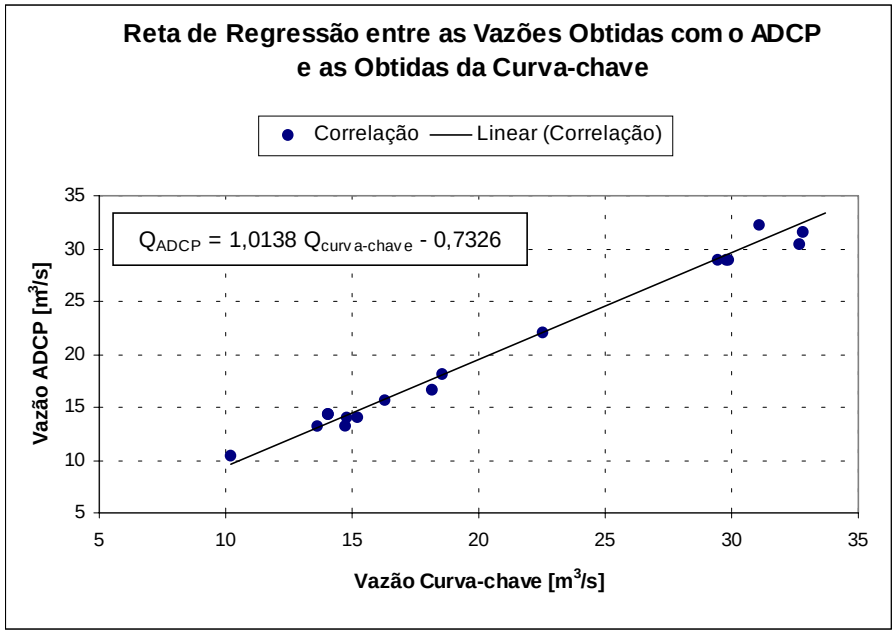

Figura 7 - Reta de regressão entre os resultados obtidos pelos dois métodos.

Para os resultados obtidos no ensaio realizado na PCH Curucaca, não foi aplicado nenhum teste estatístico, pois trata-se uma amostra muito pequena. Calculou-se apenas o desvio relativo entre o método do ultra-som, utilizado como referência, e o método do ADCP.

Na medição nº 1, os resultados foram ótimos, não apresentando desvio relativo entre os métodos. Porém, nas demais, as diferenças ficaram acima do limite aceitável, o que pode ser explicado pelo pequeno número de medições (travessias) realizado com o ADCP em cada condição de potência, devido ao curto espaço de tempo disponível para o ensaio.

Resultados obtidos por outros autores

O trabalho de Simpson e Oltmann (1993) apresentou várias medições que foram realizadas com o ADCP no Rio Sacramento, próximo à 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 "software" 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 360º, 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 (±) dos valores das subseções mudaram quando o transdutor foi girado em 180º. 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. Figura 8.

Este trabalho apresentou resultados, em geral, bastante satisfatórios. Entretanto, ficou constatado que a velocidade do barco deve estar de acordo com a velocidade da água, ou seja, a primeira deve estar sempre próxima da segunda, sem ultrapassá-la, durante a travessia da seção, para que um número adequado de amostras seja coletado, reduzindo o erro médio no cálculo da vazão. Também verificou-se que não importa qual seja a trajetória realizada pelo barco durante a medição ou a posição do transdutor com relação à rotação, esses fatores pouco influenciam a precisão.

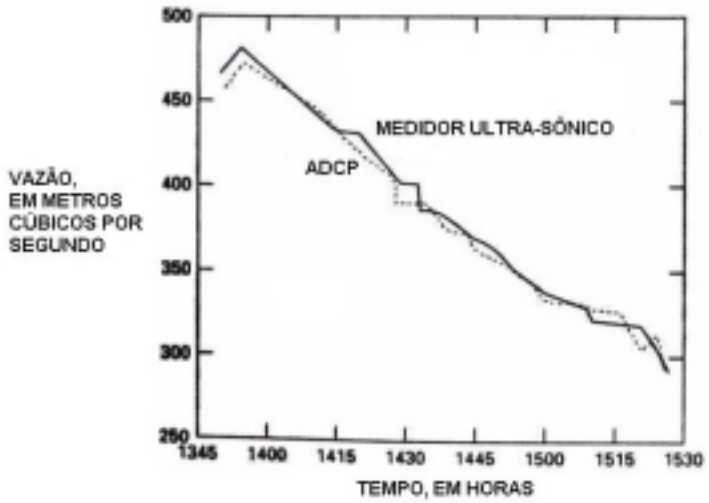

Figura 8 - Comparação entre medições realizadas com ADCP e com um medidor ultra-sônico.

Os trabalhos de Santos et al. (1997) e Gomes et al. (1999), mostraram resultados de testes estatísticos aplicados a dados coletados em medições simultâneas de vazões realizadas com o ADCP e o método convencional em várias estações fluviométricas (tabela 3). 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. Figura 9. 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.

Neste trabalho, os resultados foram aceitáveis, com um nível de significância de 5%, para quase todos os testes estatísticos, com exceção do teste onde foram comparadas a profundidade média e a porcentagem da vazão medida 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, em uma análise mais detalhada (tabelas 4 e 5), que a distribuição de velocidades e a representação geométrica da seção podem, em parte, ser responsáveis pelas diferenças de vazão (figuras 10, 11, 12 e 13).

Tabela 3 – Medições simultâneas de vazão pelos métodos convencional e acústico (ADCP)

N°	Código	Nome da Estação	Data	Cota (m)	Vazão (m^3/s) (1)	Vazão (m^3/s) (2)	Porcentagem medida pelo ADCP	Area (m^2) (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)

Fonte: Gomes et al. (1999).

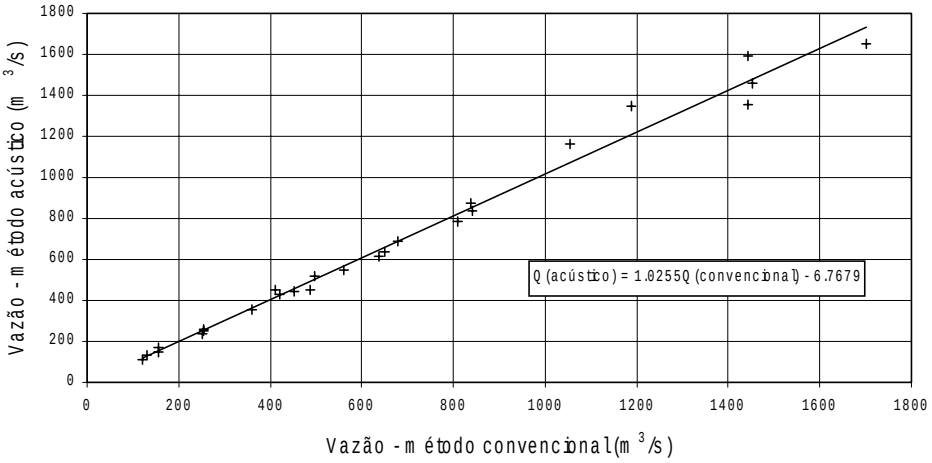

Figura 9 - Comparação entre as vazões obtidas nas campanhas de medição simultânea pelos métodos convencional e acústico.

Tabela 4 - Comparativo das medições usadas na análise detalhada das medições simultâneas pelos métodos convencional e acústico

Código	Estação	Data	Vazão (m³/s) (1)	Vazão (m³/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.

Tabela 5 - Comparativo das áreas das medições analisadas

Código	Estação	Área da seção (m²) (1)	Área da seção (m²) (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

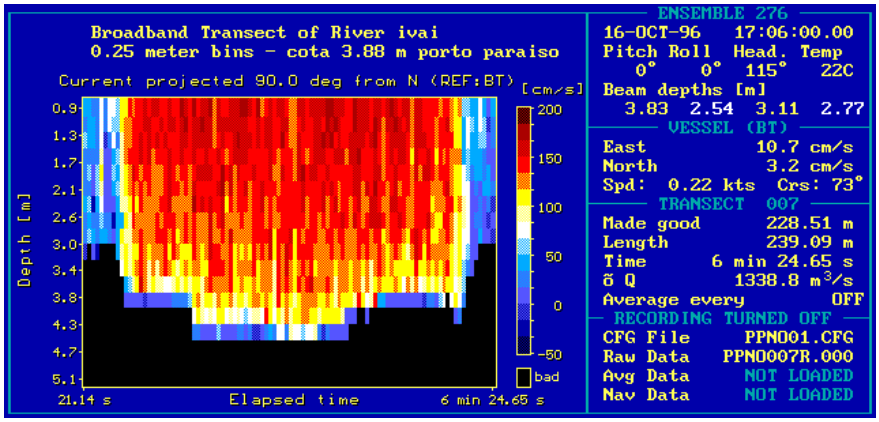

Figura 10 - Distribuição das velocidades da medição acústica em Porto Paraíso do Norte.

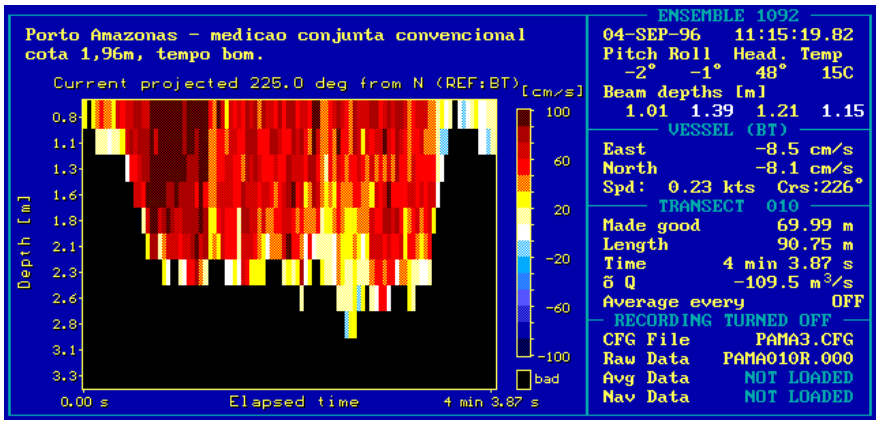

Figura 11 - Distribuição das velocidades da medição acústica em Porto Amazonas.

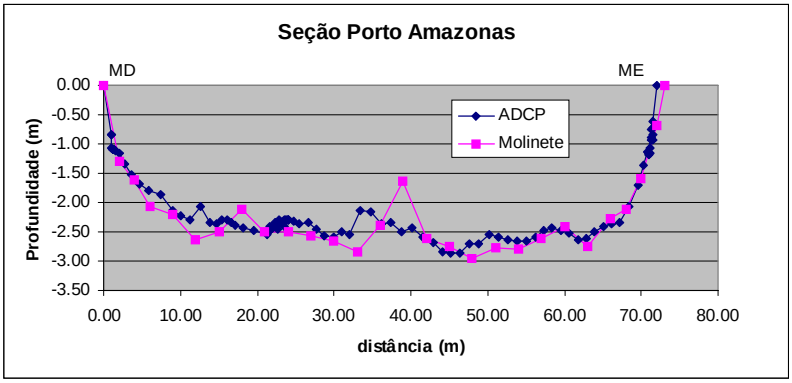

Figura 12 - Seção transversal determinada nas medições acústica e convencional em Porto Amazonas.

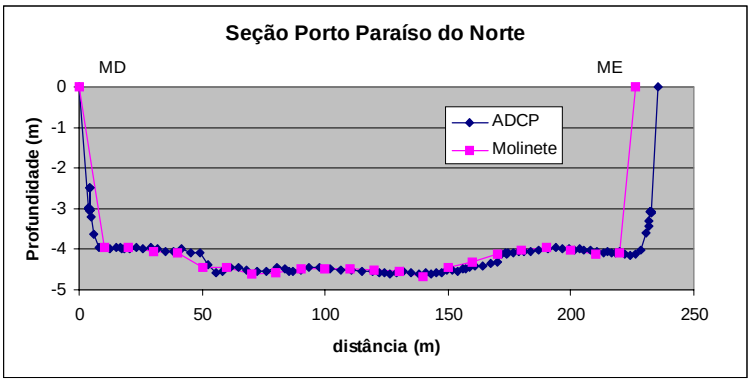

Figura 13 - Seção transversal determinada nas medições acústica e convencional em Porto Paraíso do Norte.

O trabalho de González et al. (1996), mostrou a comparação de distribuições de velocidade aproximadamente bidimensionais em um canal aberto, com as curvas de distribuição de velocidade logarítmica e de potência. 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 primeiro 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 seqüenciais, 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, ± 0,035 m/s.

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.

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 citado (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 à paredes laterais, onde o fluxo parte de um comportamento bidimensional, tem ainda que ser estudada.

O trabalho de Morlock (1996), mostrou que 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 à vazões obtidas por métodos convencionais, calculadas para o período no qual as medições com o ADCP foram feitas. As estações avaliadas cobrem uma extensa área geográfica e representam uma grande variedade de características fluviais.

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.

Neste trabalho, verificou-se que a maioria das medições realizadas com ADCP diferiu, no máximo, 5% das vazões obtidas das curvas-chave. Constatou-se, ainda, que a precisão da medição pode ser melhorada quando esta for realizada em locais onde há pouca variação no fluxo. Através da avaliação destas medições foi verificado que, apesar da seleção do local de medição e de fatores relacionados ao instrumento e à operação do barco influírem bastante na precisão das mesmas, o ADCP pode ser utilizado com sucesso sob variadas condições.

CONCLUSÕES

O uso do ADCP é particularmente indicado para condições de fluxo que não podem ser adequadamente medidas com fluxômetros convencionais. O método acústico apresenta vantagens técnicas e operacionais em relação ao convencional para uma ampla faixa de condições, tendo eliminado algumas sérias limitações dos molinetes, como a não identificação da direção das velocidades. Duas das vantagens mais relevantes do uso do ADCP em relação aos fluxômetros convencionais são: que as medições com ADCP podem ser feitas em um tempo muito menor e que ele fornece informação tridimensional da velocidade.

Segundo Santos et al. (1997) e Gomes et al. (1999), para profundidades pequenas, há um decréscimo da porcentagem de vazão diretamente medida pelo ADCP em relação à vazão total.

De acordo com Morlock (1996), apesar da seleção do local da medição influir bastante na precisão da mesma, o ADCP pode ser utilizado com sucesso sob variadas condições.

Foi constatado neste trabalho, através dos testes estatísticos aplicados, que existe uma forte correlação entre os métodos utilizados. Contudo, no momento, apesar da experiência com o ADCP para medida de descarga em fluxos e canais, em especial, para pequenos e médios cursos d’água, a confiabilidade e a precisão de medidas com o instrumento ainda não foram testadas rigorosamente no campo. Espera-se, através de novos estudos, obter resultados mais favoráveis ao seu uso em pequenos e médios cursos d’água.

AGRADECIMENTOS

À Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL – e à Organização Meteorológica Mundial - OMM - pelo apoio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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., 22-26 de Setembro, 1996.

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.

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.

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

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.