

Análise das Séries de Vazões Contínuas Obtidas em Tempo Real Através de Diferentes Técnicas com Aparelhos Acústicos Doppler Estáticos no Canal da Piracema da Itaipu Binacional: Canais quase Retangulares e Canais Trapezoidais

Paulo Everardo Muniz Gamaro¹, Benedito Martins Gomes², Luiz Henrique Maldonado¹,
Manuela Ferreira de Carvalho Rodrigues³

pemg@itaipu.gov.br, bmgomes@unioeste.br, lhmaldo@itaipu.gov.br, manuela.engenhaira@hotmail.com

Recebido: 23/06/10 – revisado: 04/12/10 – aceito: 04/09/12

RESUMO

O Canal da Piracema na Itaipu Binacional tem por finalidade básica permitir a migração dos peixes na época da piracema até as áreas de reprodução a montante da usina. Além disso, é utilizado nas competições esportivas, como de canoagem. Porém, ambas as finalidades requerem o conhecimento dos valores precisos de vazão de modo contínuo. Deste modo, este trabalho apresenta uma análise dos métodos da velocidade teórica e indexada para obtenção de dados de vazão contínua, a partir de medições de velocidade com o equipamento estático Doppler (“Argonaut-SW”), em canais artificiais quase retangulares e trapezoidais. Foram realizadas medições de velocidade/vazão com o auxílio de medidores acústicos Doppler para relacioná-los com dados de velocidades medidas com o medidor acústico estático. Como resultado, as velocidades indexadas obtiveram excelentes performances para estimar vazão e foi comprovada a aplicabilidade do método da velocidade teórica para a seção escolhida.

Palavras-chave: Vazão contínua. Doppler. Argonaut-SW. ADCP. Canais artificiais. Medições de velocidade.

INTRODUÇÃO

Com o surgimento no Brasil dos medidores acústicos “Doppler” de velocidade e vazão, em meados dos anos 90, não era imaginado o potencial de uso destes equipamentos. Muito mais que molinetes eletrônicos, estes instrumentos possibilitam medir em locais antes impossíveis e usá-los em aplicações nem existentes.

Os medidores estáticos “Doppler” são aparelhos fixos nas margens, em boias ou no fundo do canal, que medem a velocidade da água, discretizando-a em células de tamanho ajustável pelo operador (GAMARO, 2007).

Uma das aplicações dos medidores acústicos “Doppler” é monitorar vazão continuamente em canais naturais e artificiais, como por exemplo, o Canal da Piracema, localizado na Itaipu Binacional.

Com 10 km de extensão, o Canal da Piracema permite aos peixes migradores chegarem às áreas de reprodução e berçários acima da usina no período da piracema, a migração reprodutiva. A ligação é fundamental para a conservação da biodiversidade.

Concebido como um autêntico elo da vida, o Canal da Piracema tem ainda outra finalidade: a promoção do esporte. Parte das corredeiras, chamado Canal de Águas Bravas, é utilizada para a prática de esportes náuticos de competição, como canoagem slalom, rafting, entre outras.

Entretanto, as vazões que ocorrem no canal, assim como sua variação e limitações, afetam diretamente a migração dos peixes e na prática dos esportes realizados no canal da Piracema. Deste modo, foi instalado um equipamento acústico estático “Doppler” com o intuito de quantificar continuamente a vazão no canal da Piracema. Para canais artificiais de dimensões conhecidas, é possível obter a vazão através de dois métodos: velocidades indexada e teórica (SONTEK, 2004).

¹ Itaipu Binacional

² Universidade Estadual do Oeste do Paraná

³ Engenharia Autônoma

OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo avaliar os métodos de obtenção de vazão através de um medidor de velocidades estático Doppler. São comparados os métodos de velocidade teórica e indexada, no Canal de Iniciação (seção quase retangular) e de Águas Bravas (seção trapezoidal), pertencente ao Canal da Piracema da Itaipu Binacional. Além disso, verificou-se a precisão dos métodos usando como comparativo a vazão medida pelos equipamentos acústicos “Doppler” móveis.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Princípios de Operação do Equipamento Acústico Estático Doppler (ADVM)

Um ADVM (“Acoustic Doppler Velocity Meter”), doravante “SW/Shallow Water”, é um medidor estático de velocidade e utiliza um par de transdutores acústicos monoestáticos com uma orientação conhecida.

“Monoestático” refere-se ao fato de que cada transdutor acústico transmite e recebe a onda acústica. Cada transdutor do equipamento emite pulsos sonoros (“pings”) em uma frequência conhecida através do feixe acústico estreito (“Narrowband”). Durante o deslocamento dos pulsos estes “colidem” com as micro-partículas suspensas na água refletindo uma parte do som de volta ao transdutor (Figura 1). O som que retorna (eco) tem uma diferença de frequência proporcional à velocidade das partículas em suspensão, que é considerada a mesma velocidade da água (MORLOCK, 1996).

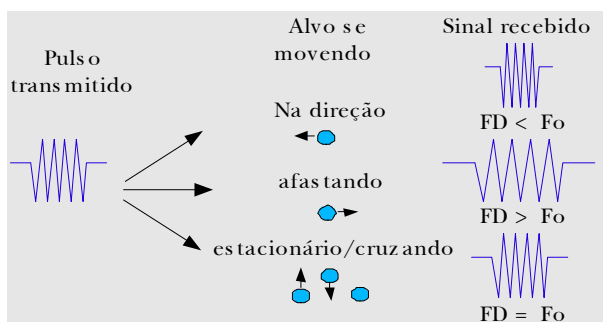


Figura 1 – Esquema do pulso emitido com frequência (FD) e recebido com frequência (Fo), em relação às partículas em suspensão
Fonte: Sontek, 2007.

Os dois feixes acústicos estão dispostos em um ângulo de 45° em um plano bidimensional que vistos de lado teriam uma forma de “V”.

Das velocidades medidas ao longo do feixe, o medidor estático calcula as componentes usando a trigonometria para computar a velocidade ao longo da área definida pelos feixes. O aparelho registra uma velocidade média da amostra; esta velocidade é representada em duas componentes (xy), sendo uma vertical e outra paralela ao leito (WARD et al., 2004).

O medidor estático faz uma amostragem de velocidades por um período de tempo programado pelo usuário (“averaging interval”) e relata as componentes xy da velocidade média deste intervalo, cuja incerteza da velocidade é (GONZALEZ; CHEN, 2005):

$$\sigma V_h \propto \frac{1}{\tan(\phi) F \sqrt{PL} \sqrt{CS}} \quad (1)$$

sendo: σV_h : incerteza da velocidade;

ϕ : ângulo do feixe (45°);

F : frequência acústica;

PL : comprimento do pulso (m);

CS : tamanho da célula.

Cálculo da vazão a partir da velocidade Teórica

Este tipo de cálculo normalmente é usado em canais artificiais com seções regulares conhecidas quando não se dispõe de dados da vazão como referência (e.g., razões econômicas, tempo). Com o equipamento montado no meio do canal, são produzidos perfis de velocidade, e como consequência a velocidade média, baseando-se na Equação de Chen (1991), que relaciona a velocidade em qualquer ponto na vertical com a velocidade média de toda vertical.

$$\frac{V}{u} = \frac{1}{m+1} \left(\frac{h}{y} \right)^m \quad (2)$$

Em que:

V : velocidade média da vertical (m.s⁻¹);

u : velocidade em qualquer ponto y (m.s⁻¹);

y : distância do fundo (m);

h : profundidade do canal (m);

m : expoente função da turbulência.

O equipamento acústico estático mede a velocidade integrada da vertical (u_{sw}) iniciando a uma

pequena distância do fundo (y_0) até a superfície (HUHTA; WARD, 2003). Integrando a Equação 2 e aplicando o expoente 1/6 da lei exponencial para canais abertos, segundo Gonzales, Melching e Oberg (1996) tem-se:

$$\frac{V}{u_{sw}} = \frac{36 \left[\left(1 - \frac{y_0}{h} \right)^{5/6} \right]}{35 \left(1 - \frac{y_0}{h} \right)} \quad (3)$$

Portanto, instalando o equipamento no centro do canal pode-se obter a velocidade média da seção a partir do perfil de velocidades medido. Finalmente, a vazão é calculada multiplicando a velocidade média pela área molhada do canal.

Cálculo da vazão a partir da velocidade indexada

Consiste na assunção de que existe uma relação empírica bem definida entre a velocidade de uma parte da seção e a velocidade média da seção de medição (CHOW, 1959). A técnica é utilizada principalmente em seções com corrente bidirecional, efeito de maré, efeito de remanso variável, ou outro em que a relação “cota x vazão” não seja biunívoca (GAMARO, 2002; MORLOCK; NGUYEN; ROSS, 2002).

Segundo Rantz (1982) para se obter a equação de regressão linear (Equação 4) é necessário realizar medições durante cheias e secas, neste caso como a vazão é controlada por uma comporta foi possível medir diferentes níveis em curto prazo.

$$V = a.V_i + b \quad (4)$$

Em que:

V : velocidade média ($m.s^{-1}$);

V_i : velocidade indexada medida pelo equipamento estático ($m.s^{-1}$);

“ a ” e “ b ”: constantes.

A velocidade média é obtida dividindo-se as vazões medidas pela área da seção transversal relativa ao nível médio durante a medição de vazão (SONTEK, 2004).

Cálculo Hidráulico

Segundo Porto (2003), para se determinar a relação entre a força de inércia e a força viscosa e se

o escoamento é laminar ou turbulento, é calculado o número adimensional de Reynolds:

$$Re_y = \frac{V.R_h}{\nu} \quad (5)$$

Em que:

Re_y : Número de Reynolds ($Re_y < 500$, laminar; $Re_y > 2000$, turbulento);

R_h : Raio Hidráulico (m);

ν : viscosidade cinemática água ($1,07.10^{-6} m^2.s^{-1}$).

Para o cálculo da relação entre a força de inércia e a força da gravidade ou se o escoamento é fluvial ou torrencial, é calculado o número adimensional de Froude:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g.H_m}} \quad (6)$$

Em que:

Fr : Número de Froude ($Fr > 1$, escoamento torrencial; $Fr < 1$, escoamento fluvial);

g : aceleração da gravidade;

H_m : Altura Hidráulica (m).

LOCALIZAÇÃO

O Canal da Piracema situa-se na Usina Hidrelétrica de Itaipu, na cidade de Foz do Iguaçu – PR, na fronteira com o Brasil e Paraguai. O canal interliga o reservatório de Itaipu com o rio Paraná a jusante da Usina, com o intuito de minimizar o impacto ambiental causado no ciclo biológico dos peixes, especialmente na época da piracema.

O complexo Canal da Piracema apresenta duas ramificações: Canal de Águas Bravas (CAB) e Canal de Iniciação (CNI), localizados na margem direita e esquerda, respectivamente, do lago central do complexo Canal da Piracema. (Figura 2). Os canais são controlados por comportas, sendo que no Canal de Iniciação a comporta localiza-se a jusante da seção e no Canal de Águas Bravas a montante da seção de medição.

O Canal de Iniciação, de forma quase retangular, tem dimensões de 7,30 x 4,0 m (largura x profundidade), com inclinação de talude Z igual a zero na margem direita e Z igual a 0,105 na margem esquerda (Figura 3a). O Canal de Águas Bravas, de forma trapezoidal, apresenta largura de 14,49 m e profundidade máxima de 1,80 m, com inclinação de

talude Z igual a 1,37 na margem direita e 1,66 na margem esquerda (Figura 3b).

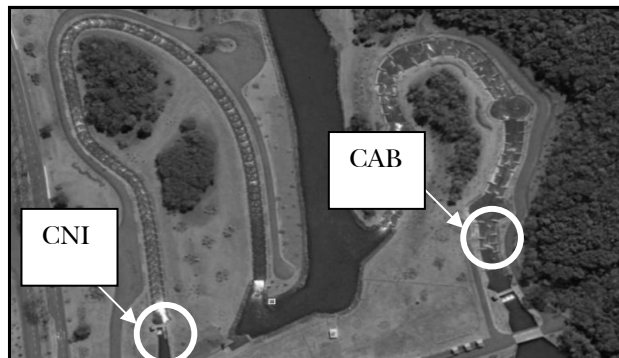


Figura 2 – Canal da Piracema. CNI (Canal de Iniciação) e CAB (Canal de Águas Bravas)
Fonte: Google Earth.

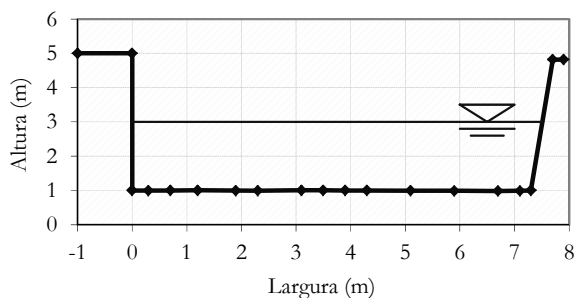


Figura 3a – Perfil Transversal da seção do CIN. Margem Direita (0 m) e Margem Esquerda (7,3 m)

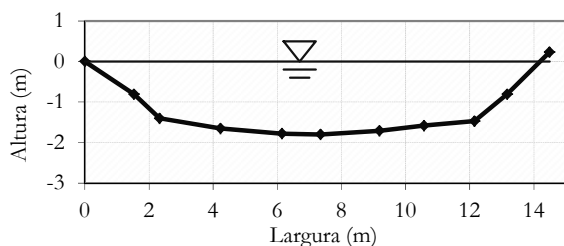


Figura 3b – Perfil Transversal da seção do CAB

MATERIAIS DE MÉTODOS

Foram instalados dois medidores acústicos estáticos “Doppler” no leito e no centro das seções transversais, de cada canal da Piracema.

O medidor acústico estático de velocidade instalado foi o “Argonaut-SW” (“Shallow Water”) de 3,0 Mhz, cuja frequência permite medir profundidades de 0,2 a 5 m e velocidades de 0,01 a 5 m.s⁻¹ (Figuras 4a e 4b).

Com o medidor acústico estático, utilizou-se o método de velocidade teórica e indexada para se estimar a velocidade média da seção.

Pela equação da continuidade, estima-se a vazão em ambos os métodos (velocidade teórica e indexada) com o produto da velocidade e da área correspondente.



Figura 4a – Medidor acústico estático instalado no Canal de Iniciação
Fonte: (IB).



Figura 4b – Medidor acústico estático instalado no Canal de Águas Bravas
Fonte: IB.

Para aplicar o método da velocidade teórica, mediu-se a lâmina d’água e sua velocidade com o medidor estático e aplicou a Equação 3 para estimar a vazão.

Para a obtenção da velocidade indexada, Equação 4, foi necessário relacionar a velocidade medida pelo equipamento estático com a velocidade média da seção, que é obtida com medidores móveis de vazão (em embarcações).

Medidores Acústicos Móveis

Foram utilizados medidores acústicos móveis e convencionais no Canal de Iniciação e de Águas Bravas, com modelos: ADP-M9, ADP-S5, Flowtracker; Micro molinete e Q-Liner.

Conforme estudo de Muste, Yu e Spasojevic (2004a), Muste et al. (2004b) e Szupiany et al. (2007), as medições de velocidade média e vazão com barco fixo (seção por seção) (JOHNSON, 2004), são potencialmente mais precisas que medições com travessias. Portanto, optou-se utilizar ambas as técnicas para obter as vazões nas medições diretas.

O equipamento ADP-M9 (Figura 5) possui três frequências acústicas, que perfilam a seção conduzindo-o de modo contínuo de margem a margem (travessias). Para se obter o resultado de uma medição de vazão é realizada a média de quatro travessias, sendo aceitável um desvio de até 5% entre as travessias (GAMARO, 2003; OBERG; MUELLER, 2007).



Figura 5 – Medição de vazão com ADPM9 no Canal da Piracema
Fonte: (IB).

O Q-liner é um equipamento acústico que utiliza a técnica da seção por seção, (JOHNSON, 2004), em que o aparelho mede o perfil de velocidades em verticais de modo estacionário. A vazão é obtida multiplicando a velocidade medida pela respectiva área.

Foram realizadas onze medições de vazão com os medidores “Doppler” móveis para o Canal de Iniciação e trinta e uma para o Canal de Águas Bravas. O método convencional (micro molinete) foi utilizado uma única vez no Canal de Águas Bravas.

Para relacionar as velocidades medidas e médias, a fim de obter a velocidade indexada, os

equipamentos estáticos e dinâmicos operaram simultaneamente.

Amostragem

O medidor acústico estático operou no período de 30 de Julho de 2009 a 17 de novembro de 2009, para o Canal de Iniciação e 29 de Maio de 2009 a 28 de Abril de 2010 para o Canal de Águas Bravas.

Durante o período de operação, foram coletados dados do medidor estático com intervalos de 15 minutos (ciclos), sendo que o resultado é a média de 10 minutos de amostragem do equipamento.

Estimativa da Área

Uma das fontes de erro da medição de vazão é a estimativa da área.

As áreas são calculadas com o auxílio do gráfico “cota X área” (Equação 7 para o Canal de Iniciação e Equação 8 para o Canal de Águas Bravas), obtidos a partir das cotas medidas pelo feixe vertical e do levantamento topo batimétrico da seção (RUHL; SIMPSON, 2005).

$$A = 7,4557 \times R - 7,5135 \quad (7)$$

$$A = 2,12 \times R^2 + 15,04 \times R - 19,59 \quad (8)$$

Em que:

A: Área molhada (m²);

R: Valor da régua que indica o nível d’água (m).

Como a área é função do valor do nível d’água, foram realizadas análises dos valores de nível medido pelo equipamento acústico estático com a leitura da régua, considerando desprezíveis os erros do levantamento topo-batimétrico.

Cálculo Hidráulico

Como existe o controle a jusante e a montante, devido a operação de comportas, foram aplicadas as Equações 5 e 6 para se determinar os tipos de escoamentos que podem ocorrer nas seções dos Canais da Piracema.

Além disso, verificou-se a possibilidade de existir uma relação biunívoca nas seções CIN e CAB, relacionando as vazões com os respectivos níveis d’água. Caso existir diferentes valores de vazão para um mesmo valor de nível, a relação é não unívoca,

impossibilitando a existência de uma curva-chave na seção.

Validação

A validação consiste na comparação das vazões medidas diretamente com as vazões estimadas pelos métodos de velocidade teórica e indexada. Assim, para a validação são necessárias novas medições de vazões, nas quais não sejam utilizadas para a correlação da velocidade indexada.

Deste modo, foram realizadas medições de vazões com os medidores acústicos móveis no dia 20/4/2010 no Canal de Águas Bravas e 26/3/2011 no Canal de Iniciação.

RESULTADOS

A relação obtida segundo as medições de velocidade do medidor estático e dos medidores móveis apresentou um R^2 de 0,999 para o Canal de Iniciação e 0,81 para o Canal de Águas Bravas. Deste modo, 99,9% e 81%, respectivamente, dos valores da velocidade média medida com os medidores de vazão móveis está diretamente relacionado com a velocidade medida com o medidor estático (Figuras 6 e 7), o que indica que a técnica da velocidade indexada é capaz de produzir velocidades confiáveis. A diferença entre os R^2 das estações ocorre devido ao posicionamento do equipamento estático. Para o canal CIN, o equipamento está instalado a montante da comporta, em um fluxo com menores velocidades e turbulências. Para o canal CAB, o equipamento foi instalado em local com maiores velocidades e turbulências (jusante da comporta), porém não invalida o resultado da metodologia.

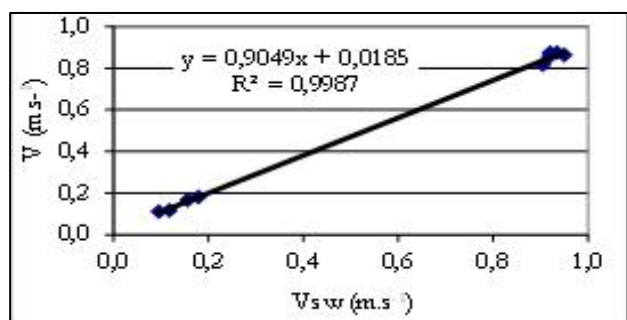


Figura 6 – Correlação entre velocidade medida pelo equipamento estático (V_{sw}) e a média da seção (CNI)

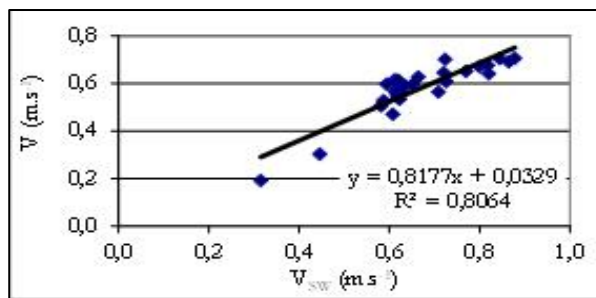


Figura 7 – Correlação entre velocidade medida pelo equipamento estático (V_{sw}) e a média da seção (CAB)

Para a série temporal, compararam-se os valores de nível d'água medidos de forma manual (visual) com os medidos pelo equipamento acústico estático, resultando em diferenças próximas de nulo, com valor máximo de 0,5% (CNI) e 2% ou 3 cm (CAB). Neste caso, o erro na leitura da régua no Canal de Águas Bravas ocorre devido à variação brusca do nível d'água, localizado a jusante da comporta. Sendo assim, as leituras de nível estão coerentes com as leituras medidas, atingindo a precisão indicada pelo fabricante (Figura 8).

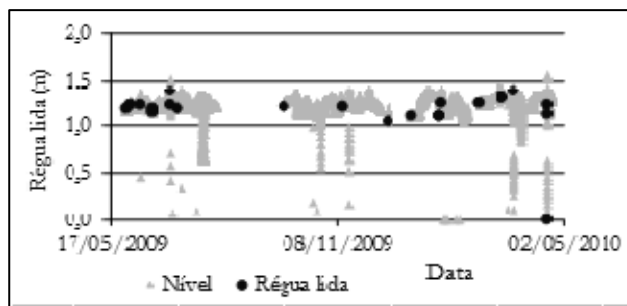


Figura 8 – Valores de régua lida e medida pelo "Argonaut-SW" no Canal de Águas Bravas

Segundo Equação 3, a relação entre a velocidade medida pelo equipamento estático e a velocidade média obtida pela equação teórica, resultaram nas constantes 0,96 e 0,94 para os canais CIN e CAB, respectivamente, o que se enquadra dentro da faixa de operação da metodologia da velocidade teórica, que varia de 0,88 a 0,98 (HUHTA; WARD, 2003).

Séries de Vazão

Canal de Iniciação

Os valores das vazões obtidas com a "Velocidade Indexada" são até 18% maiores que as vazões

obtidas com a vazão Teórica (de 1 a 3 m³.s⁻¹). Porém, para a faixa de 8,5 a 11,5 m³.s⁻¹, as vazões obtidas com a “Velocidade Indexada” são até 3,4% menores que a vazão Teórica. Deste modo, o método da velocidade teórica subestima para baixas vazões e superestima para vazões acima de 8 m³.s⁻¹. Para a análise, assume-se como referência a velocidade indexada, pois está relacionada à vazão real medida. Além disso, a velocidade teórica é suscetível a maiores erros, como posição de instalação do equipamento na seção transversal e da turbulência do escoamento.

No entanto, a diferença de vazão entre o método da velocidade teórica e indexada em valores absolutos é de apenas 0,13 m³.s⁻¹ (de 1 a 3 m³.s⁻¹) e 0,5 m³.s⁻¹ (faixa de 8,5 a 11,5 m³.s⁻¹).

As vazões medidas diretamente (ADP-M9 e Q-liner) apresentam valores médios de 3,55% maiores que as encontradas com a Velocidade Indexada e 5,86% menores que as obtidas pela Velocidade Teórica.

Este comparativo demonstra a compatibilidade do resultado da velocidade teórica com a realidade. Deste modo, apenas com a medição da velocidade e da lâmina d’água, sem a necessidade de calibrar o equipamento, é possível de se obter a vazão real do escoamento.

Segundo a ISO 748 (2007), são aceitáveis desvios de vazão de até 5%. Para o dia 21/8/2009, o desvio foi de 17,7%, valor acima do recomendado (5%), entretanto em valores absolutos este desvio foi de apenas 0,21 m³.s⁻¹, com velocidade média de 0,1 m.s⁻¹. Em condições de escoamento que apresentam velocidades baixas, a medição de vazão (estático e embarcado) tem sua precisão interferida, visto que a precisão do “SW” é de 0,5 cm.s⁻¹ (SONTEK, 2007) e do M9 é de 0,2 m.s⁻¹ (SONTEK, 2009).

Canal de Águas Bravas

As séries de vazão obtidas pelo “Argonaut-SW” foram comparadas com medições diretas de vazão (Figura 10). Como há uma comporta a montante foi possível realizar medições de vazão em diferentes aberturas de comporta (Figura 11). Os valores das vazões obtidas com a “Velocidade Indexada” são até 10% menores que as vazões obtidas com a vazão Teórica (1,41 m³.s⁻¹). Deste modo, a velocidade teórica superestima a vazão para o Canal de Águas Bravas.

As vazões medidas diretamente (ADP-M9, S5, Flowtracker, Micro-molinete e Q-liner) apresentam valores médios de 0,66% menores que as encontradas com a Velocidade Indexada, com

valores máximos de 10,89% e mínimos de -15,06%. Em relação a Velocidade Teórica, as vazões medidas foram em média 7,60% maiores, com diferenças máximas de 21,98% e mínimas -4,90%.

Para o canal de Águas Bravas a velocidade teórica não deve ser utilizada para o cálculo da vazão, devido as diferenças de vazões (Figura 10). A superestimativa de vazão utilizando a velocidade teórica ocorre porque a seção de medição está localizada na entrada do canal de Águas Bravas, onde há uma mudança da área do canal. Deste modo, o escoamento apresenta vetores de velocidade convergentes ao centro da seção e a velocidade medida pelo “SW” torna-se maior que a média. Assim, para este caso, apenas com a medição da velocidade média do “SW” e da lâmina d’água (velocidade teórica) não é possível de obter-se a vazão com precisão aceitável, o que torna necessária a implementação da velocidade indexada.

De acordo com as figuras 9 e 10, nota-se que ocorreram desvios de vazão de 15%, valor acima do recomendado (5%), entretanto o desvio médio resultou em 0,66%, considerada ótima para estimativa de vazão.

Validação

Para o canal de Iniciação, baseando-se nas vazões medidas, a série obtida pela “Equação Teórica” apresentou desvios de 0,1 a 9% e a série de velocidade indexada desvios de 2 a 19%. A diferença máxima entre a velocidade obtida pela medição de vazão e a velocidade indexada (obtida com o medidor estático) foi de 2,1 cm.s⁻¹, valor tão próximo quanto a precisão dos equipamentos: 0,5 cm.s⁻¹ para o “SW” e 0,2 m.s⁻¹ para o “M9” (SONTEK, 2007, 2009).

Para o Canal de Águas Bravas, baseando-se nas vazões medidas no dia 20/4/2010, a série obtida pela “Equação Teórica” apresenta desvio de 12 e 15% e a série de velocidade indexada desvio de 3,7 e 3,9%. Para este caso, há uma superestimativa de vazão com a velocidade teórica e comprova-se a eficiência da velocidade indexada.

Cálculos Hidráulicos

A partir da série de vazão com a velocidade indexada, constatou-se que ocorreram rápidas alterações de vazão em minutos (de 1 a 15 m³.s⁻¹), resultando em escoamento fluvial (0,03 < Fr < 0,25) e turbulento (8.10³ < Rey < 1,04.10⁶) (Figura 11) para o CNI. Para o CAB, Figura 11, o escoamento é fluvial (0,02 < Fr < 0,34), com uma ocorrência de esco

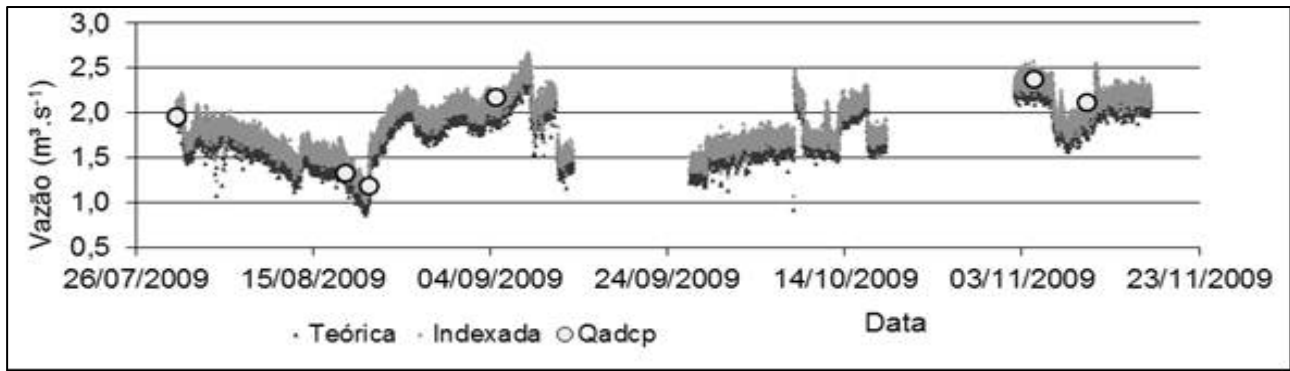


Figura 9 – Hidrograma do Canal de Iniciação, com a técnica de velocidade teórica e velocidade indexada e com medições de vazão, para vazões entre 0,5 e 3 m³.s⁻¹

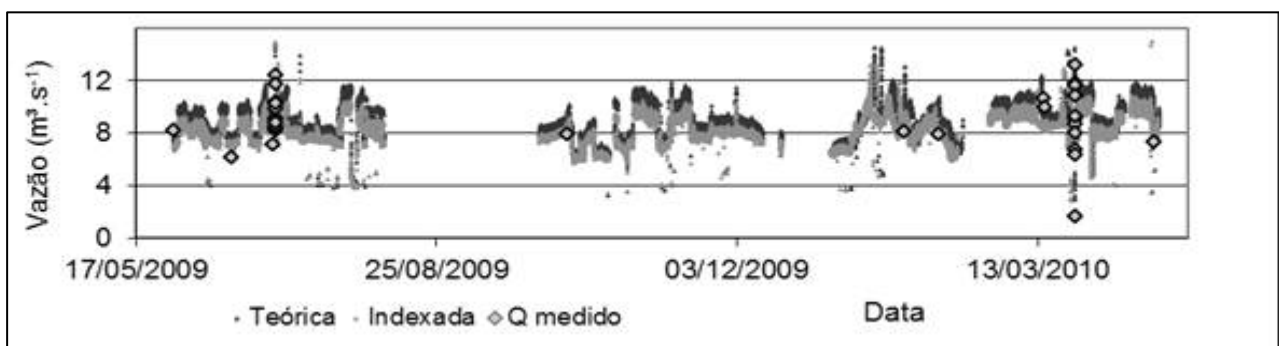


Figura 10 – Hidrograma do CAB, com a técnica de velocidade teórica e velocidade indexada e com medições de vazão, para o período de maio de 2009 a abril de 2010

amento torrencial no dia 02/07/2009 em virtude da abertura da comporta (Froude igual a 1,2). Além disso, o escoamento é turbulento ($1,5 \cdot 10^5 < Re_y < 1,03 \cdot 10^6$).

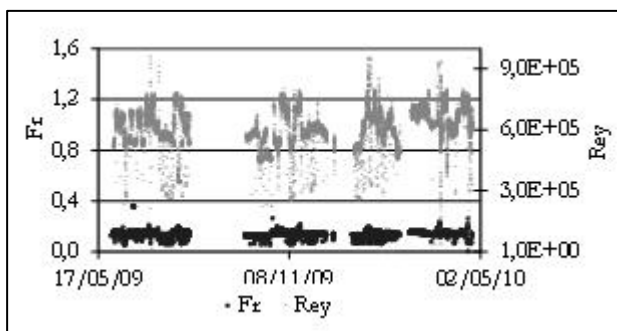


Figura 11 – Número de Reynolds (Rey) e Froude (Fr) para a seção no CAB

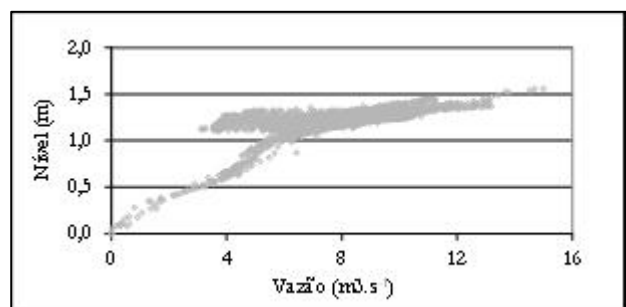


Figura 12 – Relação “vazão x régua” para a seção de medição no CAB

De modo geral o escoamento não sofre mudanças críticas com a operação das comportas, com exceção de aberturas bruscas. Com o escoamento torrencial e com o estreitamento da seção poderá ocorrer o fenômeno de ondas oblíquas e o ressalto hidráulico.

Correlacionando as vazões indexadas com os respectivos níveis, constatou-se que não é possível de se determinar uma curva-chave biunívoca (Figura 12) para os canais CNI e CAB. A não univocidade ocorre devido a presença de comportas localizadas a jusante e a montante da seção de medição, para CNI e CAB, respectivamente.

Com a operação da comporta, o escoamento torna-se não permanente e há ocorrências de ondas de translação (positiva e negativa).

CONCLUSÃO

No presente estudo, foi analisado o desempenho do medidor acústico estático instalado em canais artificiais, onde é possível utilizá-lo para medir quase diretamente a velocidade média da seção. O aparelho acústico estático instalado no Canal de Iniciação (CIN) e Águas Bravas (CAB) responde ao esperado e fornece vazões continuamente utilizando a técnica de velocidade indexada. Entretanto, as vazões obtidas pela técnica da velocidade teórica são superestimadas devido ao fato da seção estar localizada em um estrangulamento do canal, tornando os vetores de velocidade convergentes para o centro da seção. Deste modo, para a aplicação do método da velocidade teórica, deve-se conhecer o local do escoamento, como turbulência, direção das velocidades, posicionamento no ponto da velocidade máxima.

Além disso, a partir da metodologia da velocidade indexada com medidor acústico doppler foi possível de mensurar que o escoamento comportou-se de modo turbulento e fluvial, havendo uma mudança de regime para torrencial com a abertura brusca da comporta a montante.

REFERÊNCIAS

- CHEN, C. I. Unified theory on power laws for flow resistance. *Journal of Hydraulic Engineering*, Asce, v. 117, n. 3, p. 371-389, 1991.
- CHOW, V. T. *Open channel hydraulics*. New York: McGraw-Hill, 1959. p. 523-535.
- GAMARO, P. E. M. *III curso de Medidores Doppler de vazão*. Foz do Iguaçu: ANA, 2007. Apostila.
- GAMARO, P. E. M. Application of a Side-looking Doppler flow meter for measuring discharge on the southern leg of Paraná river at entrance to the Itaipu Binacional reservoir. In: *HYDRAULIC MEASUREMENTS AND EXPERIMENTAL METHODS*, 2002, Estes Park, Colorado, USA. *Proceedings...* CDROM.
- GAMARO, P. E. M. *Procedimento Padrão para Garantia de Qualidade das Medições de Descarga Líquida com Equipamentos Acústicos Doppler ADCP e ADP*. Relatório Interno da Itaipu Binacional. 2003.
- GONZALEZ, J. A.; CHEN, Z. Uncertainty of Index Velocity measurements at culverts. In: *WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS*, 2005, Alaska. *Proceedings...* Alaska: EWRI, 2005.
- GONZALEZ, J. A.; MELCHING, C. S.; OBERG, K. A. Analysis of open channel velocity measurements collected with an acoustic Doppler current profiler. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEW/EMERGING CONCEPTS FOR RIVERS*, 6., 1996, Chicago. *Proceedings...* Chicago, USA: International Water Resources Association, 1996.
- HUHTA, C.; WARD, C. Flow Measurements using an Upward-looking Argonaut-SW Doppler Current Meter. In: *IEE/OED WORKING CONFERENCE ON CURRENT MEASUREMENT TECHNOLOGY*, 7., San Diego, CA, USA, 2003. *Proceedings...*
- ISO 748. *Hydrometry – Measurement of liquid flow in open channels using current-meters or floats*. ISO, 2007.
- JOHNSON, K. Section by section ADCP discharge measurements. In: *U.S. GEOLOGICAL SURVEY HYDROACOUSTICS WORKSHOP*, 2004, San Diego, USA. *Proceedings...*
- MORLOCK, S. E. *Evaluation of Acoustic Doppler Current Profiler Measurements of River Discharge*. Indianapolis, Indiana: U.S. Geological Survey, 1996. Water-Resources Investigations Report 95-4218.
- MORLOCK, S. E.; NGUYEN, H. T.; ROSS, J. H. Feasibility of Acoustic Doppler Velocity Meters for the Production of Discharge Records from U.S.G.S. Stream Flow-Gauging Stations. Report 01-4157, 2002.

MUSTE, M.; YU, K.; SPASOJEVIC, M. Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics. Part I: moving-vessel measurements. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 15, n. 1, p. 1-16, 2004a.

MUSTE, M.; YU, K.; PRATT, T.; ABRAHAM, D. Practical aspects of ADCP data use for quantification of mean river flow characteristics. Part II: Fixed-vessel measurement. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 15, n. 1, p. 17-28, 2004b.

OBERG, K. A.; MUELLER, D. S. Analysis of exposure time on stream flow measurements made with acoustic Doppler current profilers. In: HYDRAULIC MEASUREMENTS AND EXPERIMENTAL METHODS, 2007. Lake Placid, New York, USA. *Proceedings...*

PORTO, R. M. Hidráulica Básica. 2. ed. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos, 2003. cap. 7.

RANTZ, S. E. Measurement of stage and discharge. and Computation of discharge. Washington, D. C.: U.S. Geological Survey, 1982. p. 174-175. (WRI Report 95-4230).

RUHL, C. A.; SIMPSON, M. R. *Computation of Discharge Using the Index-Velocity Method in Tidally Affected Areas*. Sacramento, California: U.S. Geological Survey, 2005. Scientific Investigations Report 2005-5004.

SONTEK. *Computing Discharge using the Velocity – index method*. USA: [s.n.], 2004. Technical Documentation.

SONTEK. *Argonaut SW system manual*. USA: [s.n.], 2007. Technical Documentation.

SONTEK. *River Surveyor S5/M9 system manual. Firmware Version 1.0*. USA: [s.n.], 2009. Technical Documentation.

SZUPIANY, R. N.; AMSLER, M. L.; BEST, J. L.; PARSONS, D. R. Comparison of Fixed-and Moving-Vessel Flow Measurements with an aDp in a Large River. *Journal of Hydraulic Engineering*, Asce, v. 133, n. 12, p. 1299-1309, 2007.

WARD C.; PIMBLE L.; MARTINERA A.; CAMISON, M. First experiences with the new Argonaut SW in

the Comunidad General de Regentes del Canal Orellana. In: ANNUAL IRRIGATION CONFERENCE, 2004, Florida, USA. *Proceedings...*

Analysis Of The Series Of Continuous Flows Obtained In Real Time Through Technical Differences With Static Doppler Acoustic Equipment In The Spawning Channel Of Itaipu Binational Dam: Almost Rectangular And Trapezoidal Channels

ABSTRACT

The Spawning Channel at Itaipu Dam is basically for the purpose of allowing the migration of fish at spawning time to the breeding areas upstream of the plant, and also for canoeing. However, both goals require knowledge of precise continuous flow values. Thus, this work presents an analysis of the methods of theoretical and index velocity to obtain continuous data flow from velocity measurements with the "Argonaut-SW" regularly in an artificial channel. Velocity measurements were performed with a mobile acoustic flow meter (ADP-M9 and Q-liner) to relate them to velocities measured with the "SW". The index velocities achieved excellent performances for estimating flow and have proved the applicability of the method of theoretical velocity for the section chosen. However, it is important that the equipment is operated by experienced and qualified people for the correct positioning of the equipment and the choice of sampling time that affects the accuracy of water velocity measurement.

Key-words: Flow, Doppler, Argonaut-SW.