

# **AVALIAÇÃO DO USO DE UM MEDIDOR DE VAZÃO ACÚSTICO DOPPLER PARA VERIFICAR A VAZÃO TURBINADA DA USINA DE ITAIPU: vazões maiores que 22.000m<sup>3</sup>/s<sup>1</sup>**

*Paulo E. Gamaro<sup>2</sup> & Karine A. Lima<sup>3</sup>*

**RESUMO** --- Conhecer o valor total real turbinado da Usina de Itaipu sempre foi um desafio, uma vez que não há medidores de vazão nos condutos forçados, medir com os métodos tradicionais não era possível, além de muito perigoso.

Com os equipamentos acústicos Doppler, não só é muito mais seguro pela ausência de cabos de aço mergulhados, como pelo tempo menor da equipe dentro d'água.

A possibilidade de comparar o valor turbinado “instantâneo” com os dados das medições pelo curto tempo para sua realização foi o fator motivante deste trabalho.

**ABSTRACT** --- Know the discharge trough the turbines of Itaipu was always a challenge, since there is no meters in the penstock, regular measurements was not possible besides it was very dangerous.

Measuring with equipments acoustic Doppler is more safe not only with the absence of wires in the water, but because the time inside the water is much less.

The possibility to compare the flow in the turbines instantly with the measurements in the tailrace because his small time to do it was the motivation factor of this paper.

**Palavras-chave:** ADCP, vazão turbinada, medições.

---

<sup>1</sup> O trabalho homônimo de 2005 é baseado em vazões turbinadas de até 22.000m<sup>3</sup>/s. O presente trabalho é, portanto, uma continuação conclusiva acerca da calibração das tabelas da vazão turbinada e da defluência total da usina.

<sup>2</sup> Engenheiro da Itaipu Binacional, Rua da Palmeira 201, 85867-120 Foz do Iguaçu-PR. E-mail [pemg@itaipu.gov.br](mailto:pemg@itaipu.gov.br)

<sup>3</sup> Técnico em Hidrologia da Itaipu Binacional, Av. Garibaldi 2525, 85869-470 Foz do Iguaçu-PR. E-mail [karine@itaipu.gov.br](mailto:karine@itaipu.gov.br)

## 1. INTRODUÇÃO

Com a possibilidade de medir a vazão no canal de fuga de Itaipu veio a idéia de se testar o uso dos medidores Acústicos Doppler para checar/medir a vazão turbinada total da Usina, e com isto ajudar a calibrar as tabelas ou medidores que porventura venham ou sejam usados para este fim.

Este trabalho apresenta desde as dificuldades de se medir em locais de defluências de  $10.000\text{m}^3/\text{s}$  a  $24.000\text{m}^3/\text{s}$ , até o resultado final apresentando alguns fatores a serem considerados para obter resultados confiáveis e qualidade.

Imaginamos que uma vez conseguido verificar a vazão turbinada total de Itaipu, a utilização dos medidores Doppler poderiam passar a ser instrumento de medição de vazão para usinas de grande porte.

## 2. MEDIÇÕES ACÚSTICAS DOPPLER

Medições Acústicas Doppler são medições em que o aparelho emite um som em uma frequência conhecida, o eco do reflexo nos microorganismos e partículas carregados pela água é medido. Pela diferença de frequência emitida/recebida sabe-se a velocidade das partículas e conseqüentemente da água. Simpson (2001)

As medições com equipamentos acústicos Doppler, são bem complexas em condições que fujam a “normalidade”, e necessitam certos cuidados para que a vazão medida, esteja próxima do valor real.

É importante então conhecer alguns pormenores que influenciam a qualidade destas medições com o intuito de tê-las confiáveis e, assim, uma comparação real.

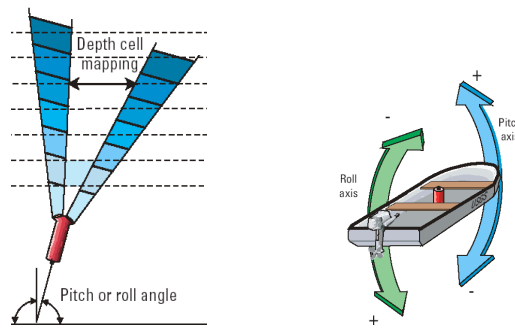
### 2.1 Fatores de influência das medições

No caso da saída das turbinas, local de grande turbulência e de alta velocidade da água e, fatores como velocidade ambígua, *pitch e roll*, definirão a qualidade da medição.

#### 2.11 Pitch e Roll

São movimentos do barco em relação aos eixos transversal e longitudinal do equipamento (Figura1).

As células ficam desalinhadas quando os valores de *pitch e roll* estão altos e, mesmo o aparelho tendo a capacidade de fazer uma correção, não é recomendável que estes valores estejam altos, o ideal é estarem abaixo de 5 graus.



Figuras 1– Desalinhamento das células e Pitch e Roll

### 2.12 Camada não homogênea

Uma das suposições principais dos medidores Doppler é de que toda a superfície que esta sendo medida com todos os feixes acústicos, neste caso quatro, tem velocidades homogêneas, isto não quer dizer que não consiga medir locais turbulentos, porem quando a turbulência é muito grande erros na leitura ocorrerão.

O aparelho possui um controle de “qualidade” onde cada par de feixes, alem de medir as componentes respectivas, mede também a componente vertical que é comparada com a mesma componente vertical medida pelo outro par de feixes e comparadas entre si, quando maior que um valor estabelecido, e que pode ser modificado pelo operador, esta célula é descartada e o aparelho registrará como “*bad bin*” (célula ruim) ou “*bad ensemble*” (vertical ruim- Figura 2) e fará a extrapolação com os valores das primeiras células validas vizinhas, isto também acontece quando o erro invalida toda a vertical.

O problema no caso da saída das turbinas é a quantidade de *bads* que acontecem, com isso a medição fica com uma área muito grande não medida, e por conseguinte a vazão desta área é extrapolada. Pelo “Procedimento de Medição dos ADCPs” existem valores específicos que dizem quando uma medição é valida ou não; uma deles é que : dependendo da área propriamente medida a medição é invalidada.

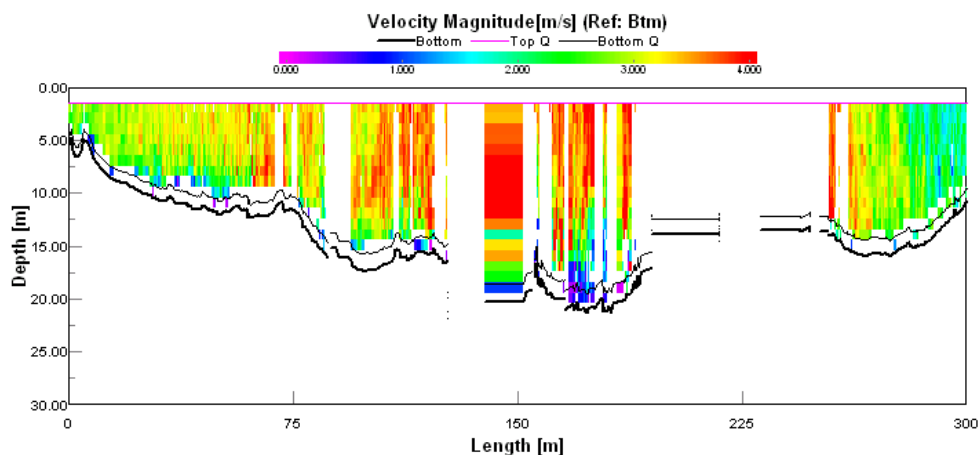


Figura 2- Vazios nas medições devido a grande velocidade e turbilhonamento

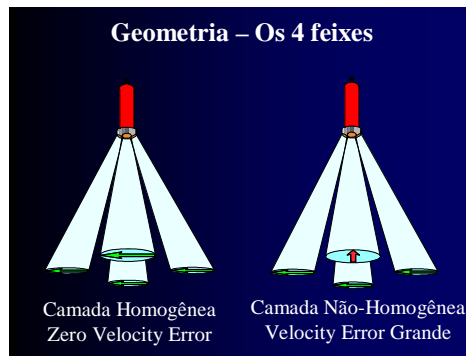


Figura 3 - Camada Homogênea e não Homogênea

### 2.13 Velocidade da água + barco

Se a velocidade da água é muito grande, a do barco também terá de ser para, vencendo a corrente, realizar a travessia. Esses valores muito altos inserem erros chamados velocidade ambígua.

A velocidade ambígua ocorre quando o efeito Doppler é medido com uma das formas de se medir, chamada por *Phase shift*. Na realidade, um efeito do efeito Doppler, e é medido por ângulos, no caso de velocidades muito altas, mediria ângulos na mesma posição do círculo trigonométrico mas, com 360 graus de diferença. Por exemplo,  $400^\circ$  e  $40^\circ$  (Figura 4).

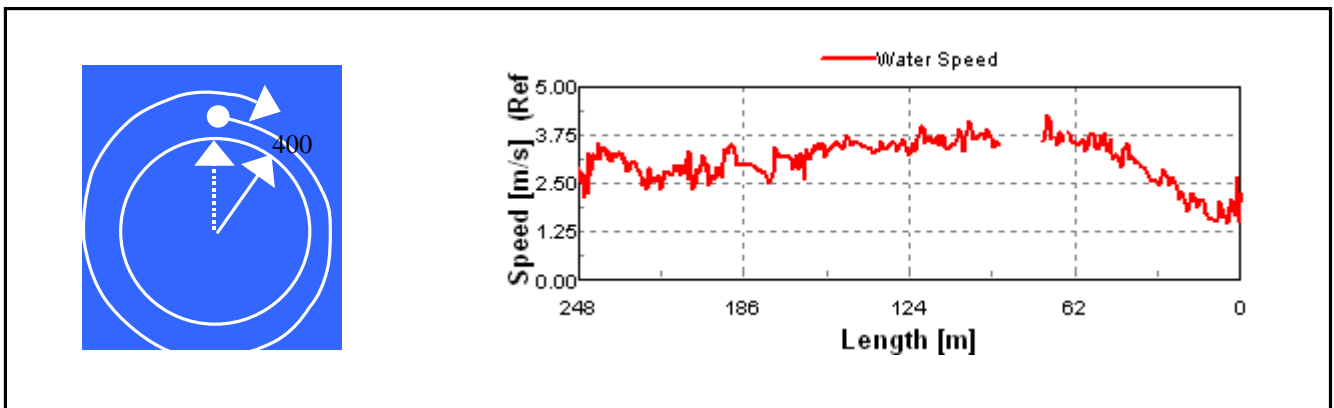


Figura 4 – Velocidade Ambígua, pelo *Phase Shift* (E) e velocidade da água (D)

### 3. A DEFLUÊNCIA TOTAL DA USINA

A defluência de uma usina consiste da vazão turbinada e/ou da vazão vertida.

A vazão turbinada é a vazão que passa pelas turbinas com fins de geração de energia. A Usina conta com 20 unidades geradores com potência nominal de 715 MW e vazão nominal de 645 m<sup>3</sup>/s, cada.

Quando a vazão que chega no reservatório é maior que a necessária para a geração de energia, o vertedor é aberto para que o nível do reservatório não se eleve.

O vertedor da UHE Itaipu é composto por 14 comportas, controladas por bombas hidráulicas. A vazão é calculada a partir do ângulo de abertura de cada uma e pelo nível do reservatório. Sendo que a capacidade máxima é de 62.000m<sup>3</sup>/s.

A programação de geração deve respeitar, também, o Tratado Tripartite<sup>4</sup>, onde não pode haver variação horária de nível maior que 50 centímetros, diária de dois metros e velocidade superficial normal maior que 2 metros por segundo na zona fronteira fluvial entre Brasil, Argentina e Paraguai<sup>5</sup>.

### 4. AS MEDIÇÕES

É considerada uma medição, em situações de estabilidade, o conjunto de pelo menos quatro travessias: duas em cada direção .Gamero ( 2006)

As medições com ADCPs fornecem a vazão e o perfil de fundo e velocidades da seção em tempo real, estando a medição completa ao terminar cada travessia.

Optou-se por considerar uma única travessia como uma medição para uma melhor comparação com a vazão turbinada “instantânea”, mas os gráficos mostram os comparativos das travessias individuais e também da média.

Cabe ressaltar que, foram consideradas para este trabalho apenas as travessias válidas, e para tanto, têm necessariamente que seguir as seguintes parâmetros:

- Vazão medida > 50% da vazão total
- *Bad bins* < 25%
- *Bad ensembles* < 10%

Inicialmente a idéia era ler a vazão turbinada em intervalos de 30 segundos, durante o tempo despendido na medição, e tirar a média. Com as dificuldades operacionais de se lidar com este intervalo de dados, optou-se por leituras do SCADA em intervalos de cinco (5) minutos e de um (1) minuto, mas ainda comparando a média do intervalo que corresponda ao tempo da medição.

<sup>4</sup> Acordo Sobre Cooperação Técnico - Operativa entre os aproveitamentos de Itaipu e Corpus. Acordo celebrado entre Brasil, Argentina e Paraguai em 1979.

<sup>5</sup> A tríplice fronteira, posto localizado no vértice dos eixos do Rio Iguazú e Rio Paraná.

A primeira tentativa foi medir simultaneamente com os dois ADCPs<sup>6</sup> de Itaipu: nas casas de força “Leito principal” e “Canal de desvio”, na seqüência, e o somatório comparar com a vazão total turbinada instantânea. Os resultados não foram bons em função das condições das seções: alta turbulência, velocidade não uniforme, e dificuldades de navegação do local; e, também, devido ao mal funcionamento de um dos equipamentos.

A segunda tentativa foi, então, realizar medições simultâneas no “Leito principal” e “Canal de desvio”, obtendo a vazão total com a soma e comparando com a vazão total turbinada. Os resultados não foram satisfatórios e optou-se por uma nova seção, “R2”, localizada a 500 m a montante do vertedor, onde as águas das duas casa de força se encontram.

#### 4.1 Escolha de um novo local

Buscou-se então um local em que o tempo de viagem não fosse um potencial de erro a mais, local onde as correntes já estivessem mais uniformes, e que se pudesse medir o total turbinado em uma única travessia.

A estação de R-4 foi escolhida por atender estes aspectos, e principalmente por se encontrar tão próxima ao Canal de Fuga que não teríamos quase nenhum tempo de viagem.

Para vazões altas, onde houve vertimento e, principalmente, se, a calha da margem direita estivesse aberta, medições em R4 eram impraticáveis. Para tanto, foi necessário deslocar-se 800 metros águas abaixo, R-4B, onde haviam condições seguras e propícias para a medição.



Figura 5 - Locais das medições: linhas vermelhas: Casas de força “Leito principal” e “Canal de Desvio”, linha branca: R2, linha azul R4, linha verde: R4B.

<sup>6</sup> A Itaipu Binacional conta com dois equipamentos Doppler, BroadBand 300 kHz e um WorkHorse Rio Grande 600 kHz, ambos da RD Instruments.

## 5. AS NOVAS COMPARAÇÕES

Foram feitas comparações em dias diferentes ao longo do ano de 2003 e 2004 e início de 2005, onde buscou-se diferentes níveis e vazões para uma análise de diferentes condições de turbinamento, no entanto estes anos não houve muita variação. Novos estudos continuaram a ser feitos e no início do ano de 2007, com a vinda de uma cheia, foi possível medir desde a subida até o pico da onda de cheia, e possibilitando um grande avanço deste trabalho.

As comparações foram divididas por faixa de vazão: menores que 10.000, entre 10.000 e 15.000 m<sup>3</sup>/s e maiores que 15.000 m<sup>3</sup>/s.

## 6. RESULTADOS OBTIDOS

Os dados coletados e comparados foram divididos em intervalos que refletissem alguma mudança significativa na vazão turbinada. Neste caso, os níveis, principalmente de jusante, são os fatores primordiais.

No entanto, por simplificação do estudo foram divididos por vazões que refletem quase que linearmente os níveis. A única ressalva aqui seria para o caso de altas vazões do rio Iguaçu independentemente das vazões apresentadas pelo rio Paraná, pois este influencia diretamente em uma alta nos níveis de jusante da usina, pois represa o canal de fuga de Itaipu.

Tabela 1 - Comparativo Vazões Turbinada e Medida ADCP menores que 10.000m<sup>3</sup>/s

Data	Travessias	Defluência	Q adcp	Diferença	Percentual
22/08/2003	1	9176.32	9232.11	-55.79	-0.61
	2	9188.33	9328.2	-139.87	-1.52
	3	9200.06	9211.24	-11.18	-0.12
	4	9222.8	9618.46	-395.66	-4.29
	5	9201.4	9094.52	106.88	1.16
	6	9202.94	9465.57	-262.63	-2.85
	7	9226.35	9279.9	-53.55	-0.58
	8	9230.59	9479.04	-248.45	-2.69
	9	9211.06	9089.11	121.95	1.32
	10	9193.9	9374.56	-180.66	-1.97
	11	9187	9290.39	-103.39	-1.13
	12	9178.61	9440.92	-262.31	-2.86
	<b>Media</b>	<b>9201.61</b>	<b>9325.34</b>	<b>-123.72</b>	<b>-1.34</b>

Observação: os valores turbinados foram observados em intervalos de 5 minutos.

Tabela 2 -Valores entre 10.000 m<sup>3</sup>/s e 15.000m<sup>3</sup>/s

Data	Travessias	Defluencia	Q adcp	Diferença	Percentual
6/12/2003	1	10598.19	11058	-459.81	-4.34
	2	10616.1	10728.8	-112.7	-1.06
	3	10695.84	10759.7	-63.86	-0.6
	4	10706.28	10888.6	-182.32	-1.7
	5	10692.87	11042.5	-349.63	-3.27
	6	10662.58	11025.8	-363.22	-3.41
	<b>Media</b>	<b>10661.98</b>	<b>10917.23</b>	<b>-255.26</b>	<b>-2.39</b>
10/1/2005	1	12966.17	12772.5	193.67	1.49
	2	12839.67	12553.64	286.03	2.23
	3	12162.24	12406.88	-244.65	-2.01
	4	12160.62	12604.2	-443.58	-3.65
	<b>Média</b>	<b>12532.17</b>	<b>12584.31</b>	<b>-52.1325</b>	<b>-0.485</b>
19/3/2007	1	13578.63	13355.17	-223.47	-1.65
	2	13450.05	13806.86	356.81	2.65
	3	12817.39	13612.74	795.35	6.21
	4	13634.7	13536.09	-98.62	-0.72
	5	13112.36	12803.84	-308.52	-2.35
	6	13833.76	13557.81	-275.94	-1.99
	7	13351.61	13546.11	194.5	1.46
	8	13660.99	13848.03	187.04	1.37
	<b>Média</b>	<b>13429.94</b>	<b>13508.33</b>	<b>78.39</b>	<b>0.62</b>

Observação - No dia 19/03 houve vertimento.

Tabela 3 -Valores acima de 15.000 m<sup>3</sup>/s

Data	Travessias	Defluência	Q ADCP	Diferença	Percentual	
11/1/2007	1	15438.48	16095.44	656.96	4.26	
	2	15544.94	15520.23	-24.71	-0.16	*
	3	15568.51	15573.60	5.09	0.03	*
	4	15568.91	15454.71	-114.20	-0.73	*
	5	15577.14	15401.63	-175.52	-1.13	*
	6	15621.38	16054.91	433.53	2.78	
	7	15640.40	15836.41	196.01	1.25	
	8	15885.58	16400.47	514.89	3.24	
	9	16707.55	17263.87	556.32	3.33	
	10	16797.61	16738.63	-58.98	-0.35	
	<b>Média</b>	<b>15835.05</b>	<b>16033.99</b>	<b>198.94</b>	<b>1.25</b>	
17/1/2007	1	17159.60	16386.31	-773.29	-4.51	**
	2	17263.91	17327.79	63.88	0.37	**
	3	17309.34	16475.82	-833.53	-4.82	**
	4	17417.16	17028.31	-388.86	-2.23	**
	5	17484.89	16985.31	-499.58	-2.86	**
	6	17529.50	16918.93	-610.57	-3.48	**
	<b>Média</b>	<b>17360.74</b>	<b>16853.74</b>	<b>-506.99</b>	<b>-2.92</b>	
22/1/2007	1	19600.02	19959.00	358.98	1.83	*
	2	19812.63	19072.00	-740.63	-3.74	*
	3	19828.79	18248.47	-353.79	-7.97	**
	4	19847.89	18733.64	-1114.25	-5.61	**
	5	19853.35	18609.83	-1243.52	-6.26	**
	6	19853.37	18174.13	-1679.24	-8.46	**
	<b>Média</b>	<b>19799.34</b>	<b>18799.51</b>	<b>-795.41</b>	<b>-5.04</b>	**



23/1/2007	1	20233.30	19465.00	-768.30	-3.80	*
	2	20263.39	20571.00	307.61	1.52	*
	<b>Média</b>	<b>20248.35</b>	<b>20018.00</b>	<b>-230.35</b>	<b>-1.14</b>	
24/1/2007	1	20227.11	20667.03	439.92	2.17	
	2	20187.60	20557.70	370.10	1.83	
	3	20196.75	20686.40	489.65	2.42	
	<b>Média</b>	<b>20203.82</b>	<b>20637.04</b>	<b>433.22</b>	<b>2.14</b>	
25/1/2007	1	20452.66	20435.20	-17.46	-0.09	
	2	20450.20	20145.59	-304.61	-1.49	
	3	20518.52	19499.24	-1019.27	-4.97	
	4	20497.85	20074.48	-423.37	-2.07	
	5	20519.30	20062.94	-456.37	-2.22	*
	6	20481.82	20133.06	-348.76	-1.70	*
	7	20501.78	20783.95	282.18	1.38	*
	<b>Média</b>	<b>20488.87</b>	<b>20162.07</b>	<b>-326.81</b>	<b>-1.59</b>	
4/2/2005	1	21670.53	21162.6	507.93	2.34	
	2	21856.19	21981.11	-124.91	-0.57	
	3	22063.76	21933	130.76	0.59	
	4	22231.21	21377	854.21	3.84	
	5	22315.65	21760.43	555.22	2.49	
	<b>Média</b>	<b>22116.7</b>	<b>22417.91</b>	<b>-301.21</b>	<b>-1.36</b>	
	1	22484.21	21828.21	-656.00	-2.92	
	2	22493.35	22527.74	34.39	0.15	
	3	22539.25	22267.57	-271.68	-1.21	
	<b>Média</b>	<b>22505.60</b>	<b>22207.84</b>	<b>-297.76</b>	<b>-1.32</b>	
13/02/2007	1	23361.58	23912.67	-551.09	-2.30	
	2	23362.84	23396.31	-33.47	-0.14	
	3	23380.79	24257.25	-876.46	-3.61	
	4	23404.54	22800.57	603.97	2.65	
	<b>Média</b>	<b>23377.44</b>	<b>23591.70</b>	<b>-214.26</b>	<b>-0.85</b>	
16/02/2007	1	22865.04	22570.96	-294.08	-1.29	
	2	22888.41	23142.76	254.35	1.11	
	3	22927.91	22941.34	13.43	0.06	
	4	22949.35	23433.19	483.84	2.11	
	5	22948.80	23724.06	775.26	3.38	
	6	22921.71	22315.90	-605.81	-2.64	
	<b>Média</b>	<b>22916.87</b>	<b>23021.37</b>	<b>104.50</b>	<b>0.45</b>	

\*Medição realizada com ADP 500 kHz \*\* Medição realizada com ADCP 300 kHz

Em todas as medições com valores acima de 15.000 m<sup>3</sup>/s, houve vertimento.

O Equipamento Broadband 300 kHz, apresentou uma variação muito grande em relação a defluência total instantânea, em contraste com o outro ADCP WorkHorse 600 kHz e para este trabalho, seus valores serão desconsiderados.

Como no intervalo anterior, podemos perceber que em todos os intervalos a média das travessias, conforme preconizado nos documentos de “Diretrizes e Procedimentos para Utilização de Medidores Acústicos de Vazão Doppler em Medições de Rios e Canais” obtém-se um melhor resultado do que as travessias individualmente, sugerindo-se até um maior número de travessias nestes.

## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Primeiramente concluiu-se que com os medidores de vazão acústicos Doppler tornaram possíveis medir-se logo abaixo da saída das turbinas e que o tempo despendido em uma medição sendo significativamente menor que os métodos tradicionais possibilitam a verificação da calibração dos valores turbinados.

No caso de Itaipu estudado os valores não passaram de 5 % indicando com isto uma ótima calibração das tabelas de vazão das turbinas.

Recomenda-se um estudo na busca de uma maior precisão inserindo os níveis do rio Iguazu e seus reflexos a jusante das casas de força .

É recomendado também o uso de níveis diferenciado para as diferentes casas de força do Canal de desvio e do Leito do rio, pois é conhecido a diferença de cota entre as mesmas.

Cabe ressaltar ainda que no caso de Itaipu o valor utilizado como aceitável para as diferença entre o medido e a tabela deve ser móvel para as diferentes faixas de vazão; uma vez que para as menores vazões, o valor limite estabelecido (5%) representa 0,65 da vazão de uma turbina, já para os maiores valores observados 5% passa a ser 1,6 a vazão de uma turbina.

Tabela 4 - Comparação de vazões pela média do conjunto de travessias contra média da defluência observada em intervalo de 5 minutos

Data	Defluência (m <sup>3</sup> /s)	Vazão ADCP (m <sup>3</sup> /s)	Cota (m)	Diferença (m <sup>3</sup> /s)	Diferença (%)	
6/11/2003	10661.98	10917.23	7.66	255.25	-2.33805	
4/2/2005	22505.6	22207.84	19.27	-297.76	1.340788	
10/1/2005	13429.94	13508.33	10.24	78.39	-0.58031	
11/1/2007	15835.05	16033.99	13.03	198.94	-1.24074	
13/02/2007	23377.44	23591.7	19.36	214.26	-0.9082	
16/02/2007	22916.87	23021.37	19.32	104.5	-0.45393	
17/1/2007	17360.74	16853.74	14.94	-507	3.008234	**
19/3/2007	12532.17	12584.31	9.81	52.14	-0.41433	
22/08/2003	9201.61	9325.34	5.96	123.73	-1.32681	
22/1/2007	20227.11	20667.03	17.22	439.92	-2.12861	*
23/1/2007	20508.575	20068.71	17.27	-439.865	2.191795	*
24/1/2007	20203.82	20637.04	17.99	433.22	-2.09924	
25/1/2007	20488.87	20162.07	18.07	-326.8	1.620865	

\* Equipamento ADO 500kHz \*\* Equipamento ADCP 300kHz

## AGRADECIMENTOS

A toda equipe da Hidrologia de Campo da Itaipu Binacional.

## 8. BIBLIOGRAFIA

GAMARO, P.E.M. (2005). “*Avaliação do Uso de um Medidor de Vazão Acústico Doppler para Verificar a Vazão Turbinada da Usina de Itaipu*”. Itaipu Binacional, Relatório Técnico.

GAMARO, P.E.M. (2006). “*Diretrizes e Procedimentos para Utilização de Medidores Acústicos de Vazão Doppler em Medições de Rios e Canais*” in II Curso de Medidores de Vazão Doppler, Foz do Iguaçu, 2006.

GAMARO, P.E.M. (2006). “*Procedimentos para avaliar uma medição de vazão acústica Doppler*” in II Curso de Medidores de Vazão Doppler, Foz do Iguaçu, 2006.

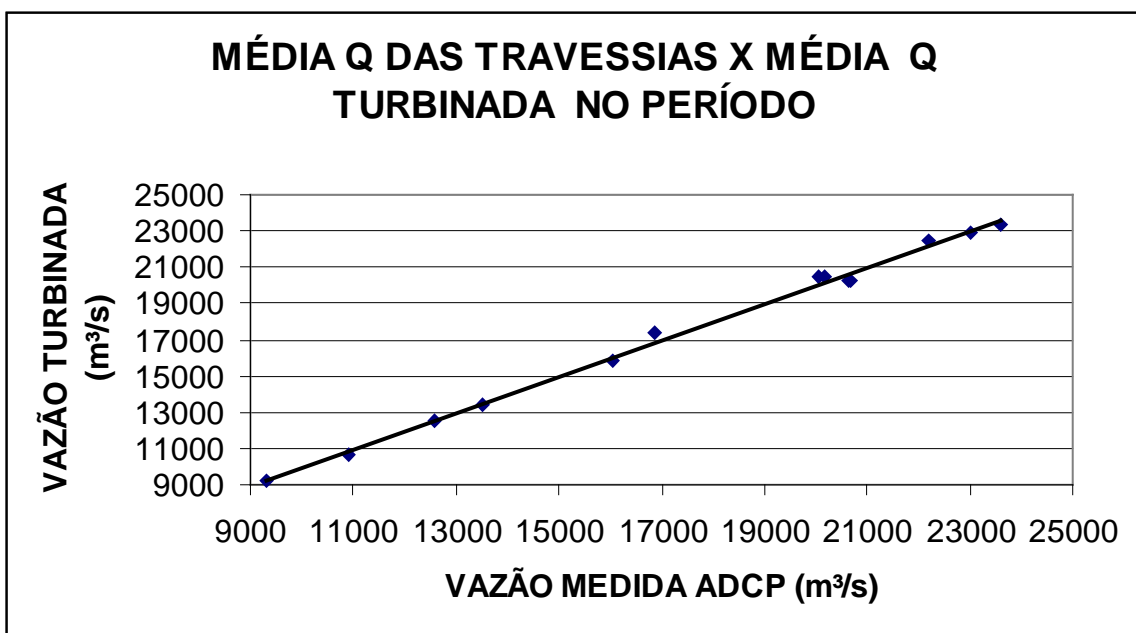
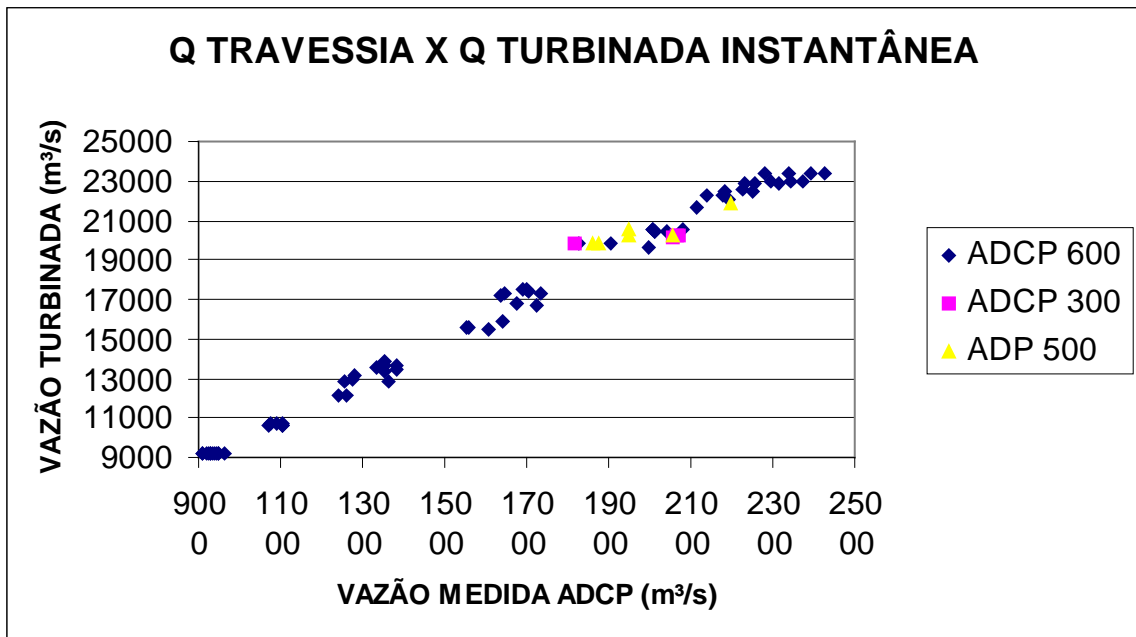
LIPSCOM, S.W. (1995). “*Quality Assurance Plan for Discharge Measurements Using Broadband Acoustic Doppler Current Profilers*”. United States Geological Survey Open File Report 95-701,12p.

MORLOCK, S.E. *et al* (1995). “*Evaluation of acoustic Doppler current profiler measurements of a river discharge*”. United States Geological Survey - Water Resources Investigation Report 95 – 701.

SIMPSON, M.R. (2001). “*Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler*”. United States Geological Survey Open File Report 01-15.

RD INSTRUMENTS (1996). “*Principles of Operation.: A Practical Primer*”. RD Instruments Acoustic Doppler Current Profiler Manuals.

## ANEXO I



## ANEXO II

