



PCHNotícias&SHPNews
Publisher: Acta Editora/CERPCH
DOI:10.14268/pchn.2017.00067
ISSN: 1676-0220
Subject Collection: Engineering
Subject: Engineering, hydro power
plants; dam

APLICAÇÃO DE UM SISTEMA ACÚSTICO POR TEMPO DE TRÂNSITO PARA MEDIÇÃO DE VAZÃO EM TURBINAS HIDRÁULICAS

¹PAMPLONA, Vitor R.M.; ²TIAGO FILHO, Geraldo Lúcio ;

³PASCHOALOTTO, Luis A.C.; ⁴PINTO, Mírian A. R. R. C; ⁵SOUZA, Gustavo F.

RESUMO

Na última década tornou-se mais presente o uso de sistemas acústico por Tempo de Trânsito para medição da vazão turbinada em turbinas hidráulicas. O presente artigo apresenta os resultados obtidos e as incertezas envolvidas em um sistema, em configurações inéditas, utilizadas em turbinas Kaplan, da UHE Porto Primavera. Os resultados obtidos poderão propiciar novos parâmetros para que a central possa operar em condições ótimas e de forma equilibrada com os demais aproveitamentos hidrelétricos existentes ao longo da bacia do Rio Paraná.

PALAVRA-CHAVE: Método acústico. Planejamento energético. Turbinas Axiais. Vazão.

APPLICATION OF AN ACOUSTIC SYSTEM PER TIME TRANSMISSION FOR FLOW MEASUREMENT IN HYDRAULIC TURBINES

ABSTRACT

In the last decade the use of acoustic systems by Traffic Time for the measurement the flow in hydraulic turbines has become more present. The present paper presents the results obtained and the uncertainties involved in a system, in un-published configurations, used to measure flow in Kaplan turbines of the Porto Primavera HPP. The results can provide new parameters so that the plant can operate in optimal conditions and in a balanced way with the other existing hydroelectric plants along the Paraná River basin.

Keywords: Acoustic method. Energy planning. Axial Turbines. Flow rate.

1. INTRODUÇÃO

Uma das grandezas mais medidas nos processos industriais é a vazão de um fluido, uma vez que a importância de medir essa grandeza está relacionada à característica dessa medida afetar outras variáveis do processo tais como pressão, nível, temperatura e teor químico. As aplicações da medição de vazão são muitas, indo desde aplicações simples como medição de vazão em estações de tratamento e residências, até medição de gases industriais e combustíveis.

Para os Aproveitamentos Hidrelétricos a medição toma sua importância na avaliação e monitoramento da eficiência energética das turbinas hidráulicas, e consequentemente de toda a central.

De acordo com as normas, em particular a IEC 60041 [15] a medição de vazão requer normalmente um instrumento específico de medição que apresenta boas exatidões nas medidas - entre 0,2% e 5% [16]. Outro detalhe importante a se destacar é a variedade de tipos de medidores de vazão disponíveis no mercado e cada um possuindo características distintas de princípio de funcionamento.

Segundo [17] a escolha de um tipo de medidor de vazão depende de alguns fatores relevantes, entre eles: exatidão desejada para a medição; tipos de fluidos e suas características; condições termodinâmicas; espaço físico disponível; custo de implementação; entre outros.

Para as turbinas hidráulicas cuja a vazão turbinada é relativamente pequena (abaixo de 1,0 m³/s) a exatidão é o ponto primordial para a avaliação da eficiência - entre 0,5% e 1,0%.

Para turbinas maiores (com vazão acima de 100 m³/s) a exatidão torna-se importante, além da avaliação da eficiência, para a gestão dos usos múltiplos dos reservatórios - incluindo a agricultura e abastecimento urbano [17]. Sendo assim, podemos caracterizar como sendo a exatidão o fator mais importante na escolha de um método para a medição de vazão em Aproveitamentos Hidrelétricos de pequeno a grande porte.

Dando ênfase a um tipo de medidor de vazão, os medidores de vazão ultrassônicos são o destaque das últimas duas décadas. Eles apresentam robustez, atingem classes de exatidão mais rigorosas (faixa de 0,2 a 2%), são capazes de medir grandes vazões, sua inserção e remoção nos processos de medição são relativamente fáceis de serem feitas, e apresentam grande flexibilidade quanto ao produto a ser medido e às condições de operação [17]. O medidor ultrassônico utiliza tecnologia de ponta em instrumentação, processamento de sinais eletrônica - característico de analisadores de alta frequência - e dinâmicas dos fluidos, estando em crescente aprimoramento de componentes para um melhor funcionamento.

Dois princípios de medição ultrassônica merecem destaques: Doppler e Tempo de Trânsito (Acoustic Transit Time). O medidor de vazão ultrassônico a efeito Doppler mede a vazão através da variação de frequência de ecos ultrassônicos emitidos pelo transdutor ultrassônico, que ao serem refletidos pelas bolhas ou sólidos contidos no líquido, retornam ao transdutor ultrassônico com frequência alterada (Efeito Doppler) [19].

Enquanto, o medidor de vazão ultrassônico pelo método Tempo de Trânsito mede a vazão através da diferença entre o

¹Vitor R.M. Pamplona Mestre na Universidade Federal de Itajubá, na programa MEMARH. (e-mails: vitor@rennosonic.com).

²Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho é professor Titular da Universidade Federal de Itajubá, Centro Nacional de Referências em PCH-CERPCH (e-mails: tiago@unifei.edu.br).

³Luis A.C. Paschoalotto trabalha na CESP (Companhia Energética de São Paulo) (e-mail: luis.paschoalotto@cesp.com.br)

⁴Mírian A. R. R. C. Pinto trabalha na Hedaidi Engenharia Ltda. (e-mail: mirian.hedaidi@gmail.com)

⁵Gustavo F. Souza. Pinto trabalha na Rennosonic Tecnologia Ltda. (e-mail: gustavo@rennosonic.com)



tempo que o pulso ultrassônico leva ao se propagar a favor do escoamento e o tempo ao se propagar contra o escoamento. Os medidores de vazão a efeito Doppler trabalham melhor em líquidos contendo partículas ou bolhas como águas residuais, enquanto os medidores de vazão pelo método Tempo de Trânsito são aplicados em líquidos limpos como a água, óleos e produtos químicos [17]. Muitos medidores de vazão possuem uma medição híbrida entre os dois princípios fazendo com que uma técnica compense a desvantagem da outra [18].

O método do Tempo de Trânsito é a mais empregada em medidores de vazão ultrassônicos principalmente quando as medições exigem erros máximos de 0,5%. Isso se deve ao fato desses medidores terem grande robustez e exatidão. Um exemplo de indústria que utiliza esses tipos de medidores de vazão é a indústria do petróleo. Devido às suas características, esses tipos de medidores podem ser utilizados na medição fiscal e de transferência de custódia, pois seguem a exigência de erro mínimo de 0,2% da OIML R-117(2007) na medição de vazão de líquidos, e de 0,5% da OIML R-137 (2006) na medição de vazão de gás natural[17].

Não há registros no Brasil de aplicação de medidores ultrassônicos em turbinas axiais (Kaplan e Bulbo), com seções não uniformes – caixa semi espiral.

2. OBJETIVO

Esse trabalho tem como objetivo mostrar os benefícios da utilização de sistemas acústicos por tempo de trânsito para medição de vazão turbinada, em aproveitamentos hidrelétricos. Trata-se de um sistema apto a ser aplicado em grandes adutoras pressurizadas, ou em canais abertos, tendo como meta a melhoria da produtividade hidroenergética e gestão dos recursos hídricos das centrais.

3. UHE PORTO PRIMAVERA

Localizada na calha do Rio Paraná, a Usina Hidrelétrica Eng. Sérgio Motta (UHE Porto Primavera) conta com potência instalada de 1.540 MW. Essa usina tem um papel importante na base do sistema nacional. Possui uma estrutura formada por 14 turbinas do tipo Kaplan Vertical – cada uma com três grandes seções de engolimento e, consequentemente, grande vazão turbinada (nominal de 651 m³/s).

4. METODOLOGIA

O método acústico de medição de vazão (ou ultrassônico), por tempo de trânsito, se baseia na medição dos tempos nos quais ondas acústicas são emitidas simultaneamente no sentido do escoamento e contra o mesmo.

Esses medidores podem ter o sistema emissor / receptor colocado externamente (sem contato com a água) ou internamente (com os transdutores em contato com a água).

O segundo caso é o aplicado a este projeto, pela viabilidade técnica do mesmo, tendo em vista a particularidade das turbinas axiais com seções de adução não uniformes.

No presente trabalho foram instalados medidores ultrassônicos nos três vãos de entrada da tomada d'água da turbina hidráulica da Unidade Geradora nº 9, (UG 09) da UHE Porto Primavera, de tal forma que em um dos vãos, aplicou-se a especificação de número de caminhos ultrassônicos previstos em norma para grandes seções de adução (18 caminhos ultrassônicos – 36 transdutores; [1, 2]) e, nos dois outros vãos, foi avaliada uma redução na quantidade de caminhos, utilizando-se 8 caminhos (16 transdutores), validando-se praticamente a mesma precisão

na qualidade dos sinais e da medição (desvio de 1,2% entre valores medidos com 18 e 8 caminhos obtidos na análise).

O projeto também contemplou a avaliação da viabilidade técnica de instalação de transdutores ultrassônicos a jusante de uma turbina Kaplan da UHE Porto Primavera (UG 14), para verificação da influência dos vórtices e bolhas formados no tubo de sucção, sendo essa configuração inédita no âmbito mundial podendo representar uma grande alternativa para o monitoramento da vazão turbinada, de forma precisa, em centenas de turbinas existentes no mundo.

Para a aquisição de dados e determinação da vazão o sistema selecionado foi o transmissor de vazão Caldon Hydro™ LEFM® 880, consolidado mundialmente na medição de vazão de óleo, gás e água, cuja a especificação está apresentada nas tabelas I, assim como do transdutores na Tabela II, mostrados nas Figuras 1 (a) e (b). Dessa forma, a vazão medida é transmitida ao sistema de supervisão da usina, através de sinal analógico, possibilitando o seu monitoramento em tempo real, e consequentemente a comparação desses dados medidos com os valores de vazão tabelados em função de queda bruta e da geração.

[Tabela 1]: Especificações técnicas do Sistema de medição de vazão

Caixa	NEMA 4/IP 66	Frequência das Medições	Até 50 Hz (50 por seg.)
Display	Gráfico	Processamento de Dados	Filtro desvio/ mediana
Entradas	16 TRAs	Medição de Tempo	Osciladores Duplos com resolução de 0.6nS
Saídas Digitais	2 x RS-485/RS-422	Temperatura de Armazenamento	-50 a 75°C (58 a 167°F)
Saídas Analógicas	1 x 0/4-20 mA	Temperatura de Trabalho	-30 a 60°C (22 a 140°F)
Interface de programação (software)	Sim	Faixa de Temperatura de Op. do Display	0 a 50°C (32 a 122°F)
Capacidade Modbus	Sim	Umidade	0-99% s/ condensação
Entradas Analógicas	2 x 0/4-20 mA	Suprimento de energia	90-240 VAC/47-63 Hz, 16-28 VDC, 15 Watt
Saídas de Totalização	Pulsos e dados digitais	Peso aproximado para embarque	34 lb (15 kg)
Memória/Data Logging	USB	Precisão	±0.5%
Processamento de Sinais	ACG Cross-Correlation Zcd		

Além do monitoramento em tempo real mais efetivo, a medição da vazão permite levantar as curvas de operação e rendimento das turbinas com maior efetividade e nas condições reais de operação, em função da variação da queda bruta podendo, dessa forma, atualizar a curva colina, identificar comportamentos diferentes do previsto no projeto da turbina e faixas de operação bem distintas que podendo contribuir para adequações operacionais da máquina de forma a se buscar as condições ótimas de operação para as condições impostas à máquina.

[Tabela 2]: Especificações técnicas do Transdutor Omnidirecional

Frequência de operação	500 Hz
Faixa de ângulo do caminho	30 a 75 °C
Pressão máxima de operação	2,2 bar
Faixa de medição de temperatura	0 a 55 °C
	-15 a 60 °C
Material de construção	CPVC /PVC/ Resina Fenólica

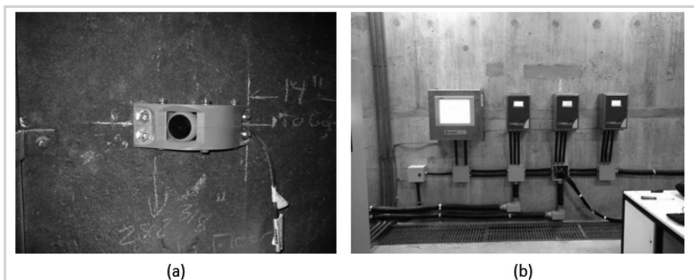


Fig. 1: (a) Transdutores unidirecional do tipo "Eyeball" Caldon Hydro™ - CAMERON, (b) - Medidor de vazão ultrassônico modelo LEFM® 880 Series - Caldon Hydro™ - CAMERON. Fonte: acervo próprio.

Comparação entre os métodos mais utilizados para medição de vazão em turbinas hidráulicas:

O método que já foi, há algum tempo, tomado como referência e por isso considerado o mais confiável para medição de vazão em turbinas hidráulicas é o método Winter - Kennedy, porém através pesquisas e estudos verificou-se que, comparativamente, o método ultrassônico apresenta exatidão e precisão superiores. O método ultrassônico permite a melhor regulagem da máquina de modo que ela trabalhe de forma mais eficiente.

Na Figura 2 é possível comparar as diferenças entre as curvas de rendimento de uma turbina cujas vazões foram medidas pelos métodos Winter-Kennedy, mais disperso, e Ultrassônico, mais concentrado.

A Figura 3 apresenta as diferenças entre as curva de operação de uma mesma máquina, cujos rendimentos foram calculados com base em vazões medidas pelos dois métodos

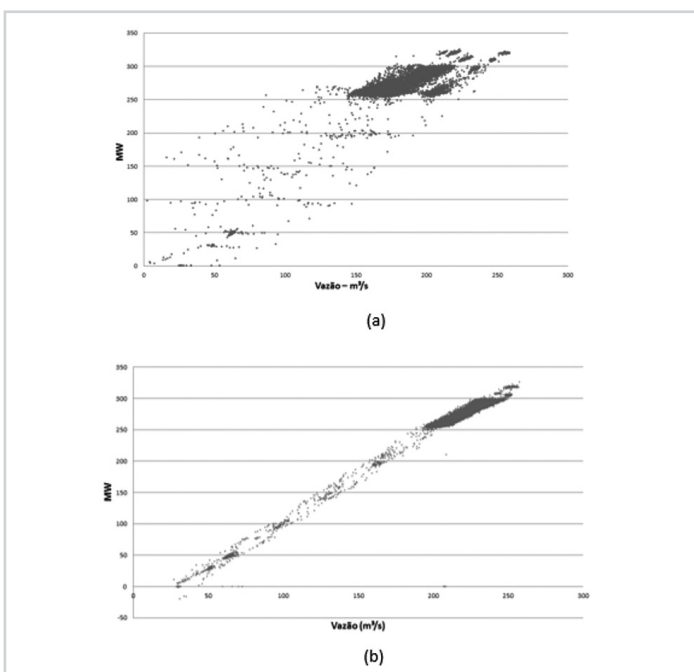


Fig. 2: (a) Curva Potência x Vazão - Método Winter-Kennedy [5]; (b) Curva Potência x Vazão - Método Ultrassom [5]

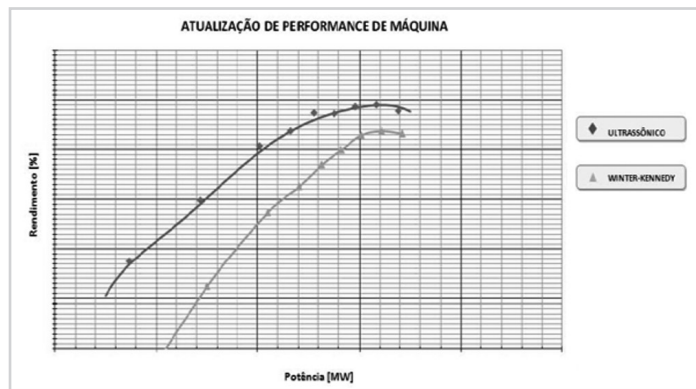


Fig. 3: Curvas de Potência x Rendimento medidas pelos métodos Winter-Kennedy e Ultrassônico [5]

Tendo em vista que o método de medição de vazão por tempo de trânsito se baseia na medição do tempo de ondas acústicas de um emissor para um receptor, sendo um deles posicionado para emissão a favor do sentido de escoamento e outro contra o mesmo [6]. No presente projeto é considerado o uso de sensores não intrusivos, mas internos ao "conduto", sendo fixados nas paredes das baias da tomada d'água. Nesse método, a vazão é linearmente proporcional à diferença dos tempos que levam as ondas para percorrer uma distância, com equacionamento como apresentado nas equações 1 e 2. [6]:

$$\Delta T = \frac{2 \cdot \bar{v} \cdot L_s \cdot \cos \theta}{v_s^2} = \frac{2 \cdot \bar{v} \cdot D}{v^2 \cdot \tan \theta} \quad (1)$$

$$Q = \frac{\pi \cdot D \cdot v_s^2 \cdot \tan \theta}{8} \cdot \Delta T = k \cdot \Delta T \quad (2)$$

Onde L_s é a distância percorrida pela onda acústica; v_s é a velocidade do som no fluido; v é a velocidade num ponto do escoamento; D o diâmetro do tubo; k é a constante resultante da operação, θ é o ângulo da trajetória do caminho acústico entre os sensores

5. ASPECTOS RELACIONADOS ÀS INSTALAÇÕES

Em razão da medição de vazão utilizada no de P&D ser do tipo ultrassônica, foram estudados, previamente, os fatores associados ao escoamento na saída da turbina que possivelmente influenciariam na precisão da leitura. Os principais fatores são elencados a seguir.

- Presença de bolhas e particulados no escoamento. A presença de componentes transversais no escoamento, como por exemplo, bolhas e particulados promovem efeitos de espalhamento, atenuação e refração do sinal acústico original.
- Distorção do perfil de velocidade. Alguns autores mostram que o aumento da turbulência (número de Reynolds) promove uma redução da precisão do medidor [9-12]. A figura 4 representa a influência da turbulência no caminho acústico.

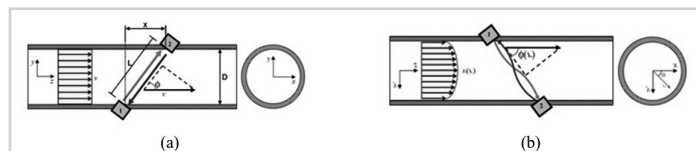


Fig. 4: Caminho acústico em escoamento laminar (topo) e turbulento. [12]

a) Instalação experimental - à Jusante:

Numa primeira etapa do trabalho como objetivo a avaliação qualitativa dos sinais ultrassônicos nesse ambiente instalou-se um sistema como o proposto no tubo de sucção da Unidade Geradora



nº 14. Neste caso, para a definição dos pontos de instalação onde se teriam melhores chances de obtenção do sinal ultrassônico, contou-se com o auxílio de consultoria internacional [13] que decidiu por instalar 3 caminhos ultrassônicos na seção direita a jusante da turbina, conforme mostrado nas Figuras 5 (a) e (b)

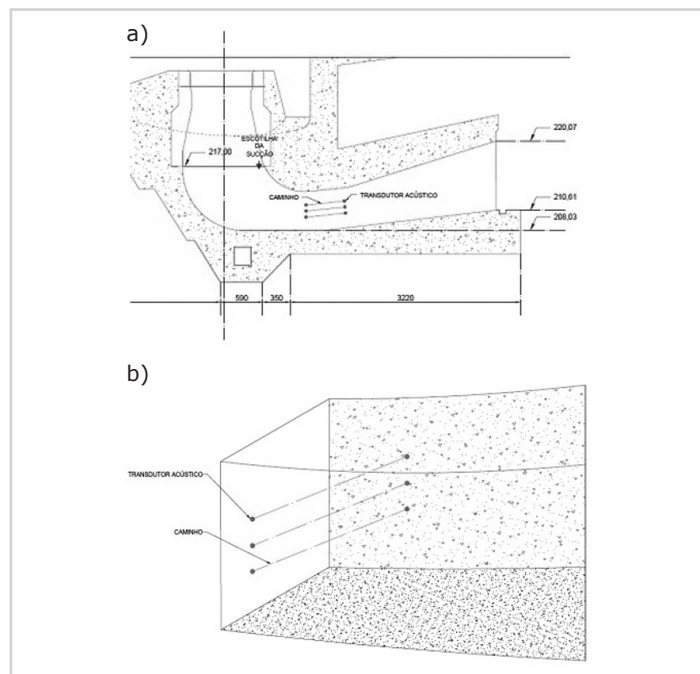


Fig. 5: (a) Corte longitudinal do tubo de sucção. Fonte: Elaboração própria; (b) Detalhamento de uma das duas seções de saída do tubo de sucção. Fonte: Elaboração própria

Devido às dificuldades no acesso aos locais de instalação, o único ponto de acesso para os cabos seria abaixo do tubo de sucção, conforme mostrado nas Figuras 5(a) e (b). O cabeamento dos transdutores ao medidor foi condicionado através da grelha de escoamento com sua transposição, por meio de uma válvula fixada na tubulação de drenagem, conforme mostrado nas Figuras 6 (a) , (b) e (c)

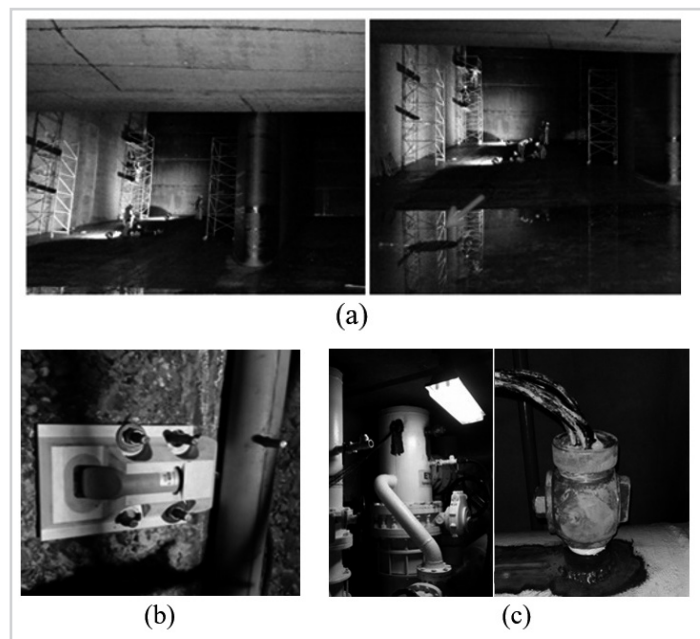


Fig. 6: (a) Bifurcação de saída do tubo de sucção e grelha de escoamento. (b) Transdutores instalados. (c) Transposição de cabos e vedação da válvula. Fonte: Acervo próprio

Ao se partir o grupo gerador, no caso o UG 14, constatou-se que o fluxo de água pelos cabos aumentou, e a resposta dos transdutores acústicos face à excitação do sistema de medição não foi obtida. A rejeição de sinal alcançou 100%, ou seja, sem comunicação entre os transdutores, O que ocasionou a impossibilidade de se concluir acerca dos sinais na instalação experimental, a jusante. Em função disso, descartou-se a possibilidade técnica de instalação de caminhos ultrassônicos no tubo de sucção por análise de sinais, e mudou-se o foco para a instalação definitiva, a montante.

b) Instalação permanente – Montante

Para essa etapa, realizada na Unidade Geradora UG 09, também contou com a participação do especialista do exterior[14] - que participou das medições necessárias e marcação das primeiras elevações dos transdutores, para orientar a instalação.

Considerando-se que a tomada d'água consiste de três seções, inicialmente procedeu-se à montagem dos transdutores e instrumentação na seção central da adução da UG 09, denominada Baia B. Após o encerramento da instalação na Baia B, optou-se por fazer a instalação na seção direita e esquerda a montante da adução da UG 09, denominadas respectivamente, Baia C e Baia A, conforme mostrado na Figura 7 (a), (b) e (c), para 8 1e 18 caminhos

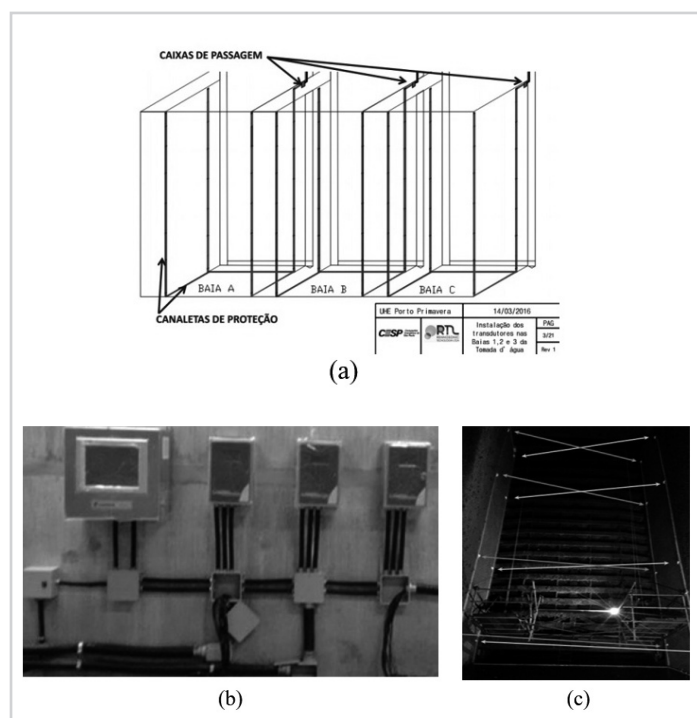


Fig. 7: (a) Esquema das instalações de 8 e 18 caminhos ultrassônicos. Fonte: Elaboração própria; (b) Medidores de vazão instalados, em fase de acabamento. Fonte: Acervo próprio; (c) Transdutores já instalados na Baia C (16 transdutores) e representação gráfica da comunicação entre os transdutores. Fonte: Acervo próprio

Considerando que as seções são curvas desde os pontos mais próximos às comportas, utilizou-se métodos de integração Gauss-Legendre para selecionar os parâmetros de correlação para a determinação das elevações dos transdutores.

Após os testes iniciais na três seções, verificou-se que a Baia A apresentava um escoamento mais turbulento, exigindo avaliações mais elaboradas para obtenção da vazão nessa seção. Desta forma, escolheu-se então a Baia A para receber a instalação de 18 caminhos ultrassônicos (36 transdutores). A partir desta instalação foi feita análise que permitiu configurar 8

caminhos ultrassônicos nas 3 Baías, mantendo-se a precisão das medições.

A Figura 7 (b) mostra os medidores de vazão instalados, sendo posicionados da esquerda para a direita, Baía: B, A e C e a Figura 7 (b) mostra os transdutores instalados em uma das três baías com indicação da comunicação entre os transdutores.

6. INICIALIZAÇÃO DO SISTEMA

Para inicialização do sistema ultrassônico por tempo de trânsito, fez-se uma configuração inicial da seção de adução A da Unidade Geradora UG 09 com 18 caminhos ultrassônicos, de modo a possibilitar a comparação entre os dados obtidos com o sistema configurado em 18 caminhos e 8 caminhos, de forma a possibilitar a determinação um fator de desvio entre as medições que tornasse possível a configuração de 8 caminhos definitivamente. Para se determinar o fator de medição de 18 caminhos que aplicado a 8 caminhos fornecesse alta precisão na medição, analisou-se os valores de velocidade do fluxo para 5 patamares de carga (35, 45, 58, 77 e 100 MW. A Tabela III mostra os valores de velocidade do fluxo para 18 e 8 caminhos, no patamar de 100MW, o que possibilitou verificar o desvio entre as medições e consequentemente um fator de correção que permita a medição com 8 caminhos com precisão de 18 caminhos.

A partir da definição dos parâmetros de correção validados, foram aplicadas nos 3 medidores (Baías A B e C), deixando o sistema operacional medindo a vazão em tempo real, a partir desse momento e os perfis de velocidade com medição de 18 e 8 caminhos, indicando que a tendência da curva se mantém coerente, está mostrado na Figura 8 (a) e a qualidade dos sinais obtidos via interface software com o sistema, na Figura 8 (b)

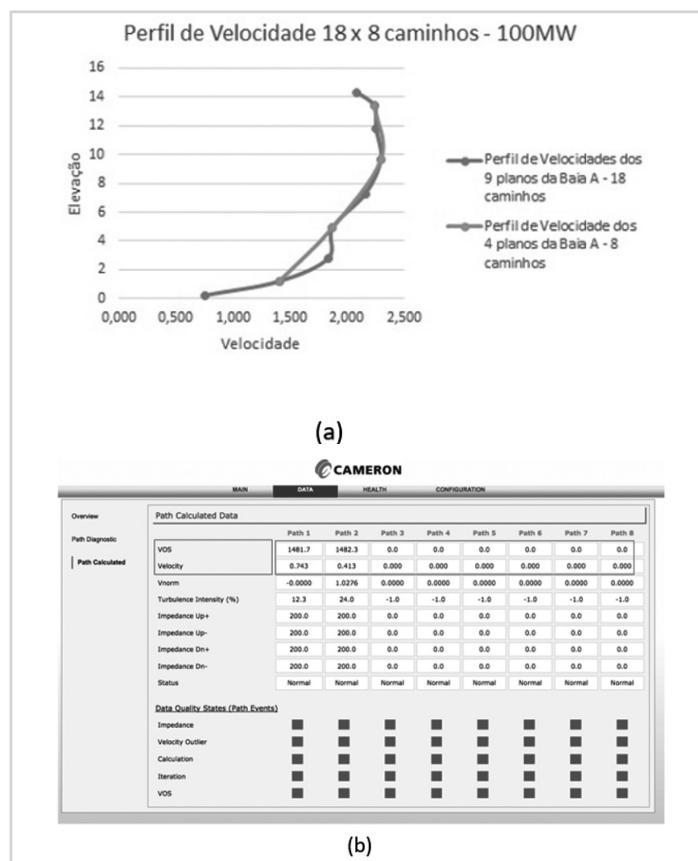


Fig. 8: (a) Comparativo entre o perfil de velocidade no escoamento, medidos com 18 e 8 caminhos ultrassônicos. Fonte: Elaboração própria. (b) Diagnóstico dos 8 caminhos da Baía A, em configuração definitiva. Fonte: Extraído do software de interface

[Tabela 3]: Avaliação de medições 100 MW - Baía A. Fonte: Elaboração própria

Caminho	Caso de 18 caminhos		Caso de 8 caminhos	
	Velocidade	Peso	Velocidade	Peso
1	2,086	0,020		
2	2,241	0,045	2,241	0,087
3	2,258	0,065		
4	2,299	0,078	2,299	0,163
5	2,163	0,083		
6	1,874	0,078	1,874	0,163
7	1,836	0,065		
8	1,404	0,045	1,404	0,087
9	0,750	0,020		
10	1,688	0,020		
11	1,772	0,045	1,772	0,087
12	1,783	0,065		
13	1,709	0,078	1,709	0,163
14	1,530	0,083		
15	1,491	0,078	1,491	0,163
16	1,368	0,065		
17	0,964	0,045	0,964	0,087
18	0,338	0,020		
Q Total [m³/s]	172,304		174,026	
Desvio [%]	1,00			
Meter Factor	0,990			

Os valores de rejeição de sinais (Reject %) em zero, conforme mostrado na Figura 8 (b), indicam comunicação perfeita entre os transdutores dos caminhos, enquanto o SNR (relação sinal/ruído) alto mostra alta intensidade do sinal e Ganhos (Gain Up/Dn) baixos mostram níveis ótimos de amplificação de sinais. Assim, os resultados apresentados nessa etapa direcionaram para um baixo desvio das medições de vazão utilizando 18 e 8 caminhos. Com um fator de correção médio de 0,988, encontrado por meio dos 5 patamares de carga avaliados, ou seja, com uma diferença média entre as medições de 1,22 % é possível considerar segura a medição com o número reduzido de caminhos ultrassônicos.

Avaliação de rendimento da turbina, utilizando o sistema de ultrassom por tempo de trânsito para medição da vazão:

Uma vez instalado e validado o sistema de ultrassom por tempo de trânsito na seção de entrada da turbina grupo UG 09, procedeu-se ensaios para obtenção da curva de rendimentos da máquina bem como a para avaliar suas condições de estabilidade mecânica. Para a realização do ensaio foram utilizados os instrumentos instalados em pontos de medição da unidade geradora, determinados previamente, e informações extraídas diretamente do painel do regulador de velocidades - RV - da unidade geradora. Os sinais coletados e locais de medição foram os seguintes:

- Nível d'água Montante e Jusante: Os sinais de nível de montante e jusante foram extraídos diretamente do painel do Regulador de Velocidades - RV, podendo ser conferidos por relatório emitido pelo mesmo via SDSC.
- Pressão da entrada da caixa semi-espiral: foi medida através de um transdutor de pressão piezoresistivo instalado no bloco de derivação específico para este fim.



- c) Pressão de saída do Tubo de Sucção: foi medida através de um transdutor de pressão piezoresistivo instalado no bloco de derivação específico para este fim
- d) Vazão Relativa Turbinada: foi determinada pelo método Winter-Kennedy, sendo que a pressão diferencial na caixa semi-espiral foi medida através do transdutor de pressão diferencial,
- e) Flutuação de pressão na escotilha tubo de sucção: foi medida por um transdutor de pressão tipo piezoresistivo instalado na tomada de pressão próxima a escotilha de inspeção.
- f) Flutuação de pressão na tampa da turbina: foi medida por dois transdutores de pressão tipo piezoresistivo instalados no bloco de derivação específico para este fim
- g) Oscilação de Eixo do Mancal Guia da Turbina e do Mancal Guia do Gerador: foi medida através de dois transdutores de deslocamento tipo indutivo da marca VIBROCONTROL, modelo PS1002/GS5001, instalados em suportes junto ao MGT, separados de 90° entre si e localizados a montante e à direita da Unidade Geradora, na parte superior dos mancais.
- h) Potência Ativa (Sinal do Regulador de Velocidade): foi lida diretamente do painel do Regulador de Velocidades - RV, através de um sinal analógico de 4 a 20 mA, podendo ser conferida por relatório emitido pelo mesmo, via SDSC.
- i) Rotação (Sinal do Regulador de Velocidade): foi medida através de sinal de 4 a 20 mA disponível no painel RV.
- j) Abertura do distribuidor e rotor Kaplan (Sinal do Regulador de Velocidade): foi medida através de sinais analógicos de 4 a 20 mA disponíveis no RV.
- k) Sistema de aquisição de dados: Para coleta e armazenamento de todos os dados dos ensaios realizados, foram utilizados os seguintes equipamentos: sinais analógicos: Sistema ADS 2002 / LYNX Tecnologia / 32 canais e análise de Sinais por um Notebook Dell.

7. RESULTADOS

Foram realizados procedimentos de ensaio ON CAM e OFF CAM, sendo que no segundo concluiu-se que a melhor conjugação (relação de abertura rotor-distribuidor) encontrada, já era a aplicada na operação da máquina:

Conjugação Atual – ON CAM: Com o Regulador de Velocidade (RV) em modo de controle de potência, estabilizou-se a UG em uma condição de carga previamente definida. Nesta etapa foram analisados os seguintes patamares de carga da UG 09 em média: 96%, 91%, 82%, 73%, 63%, 54%, 45% da potência nominal. Para cada patamar de potência efetuou-se a coleta dos sinais analógicos, pelo sistema de aquisição, em uma taxa de amostragem de 2.000 Hz (2 kHz).

Medição Desconjugada – OFF CAM: Com o Regulador de Velocidade (RV) em modo de controle de potência, estabilizou-se a UG em uma condição de carga previamente definida. Após atingido este patamar alterou-se o parâmetro de controle do RV para abertura. O Regulador de Tensão (RT) foi ajustado para fator de potência unitário a fim de se obter Potência Aparente $\approx$ Potência Ativa ($MVA_r \approx 0$). Fixou-se então a abertura do Rotor pelo seu limitador de abertura, através do controle individual de abertura do Distribuidor efetuou-se o fechamento e abertura em relação ao ponto de partida, obtendo-se curvas individuais para cada abertura do rotor.

A figura 9 mostra um dos gráficos encontrados para o Rendimento da turbina, em função de Potência e Vazão turbinada.

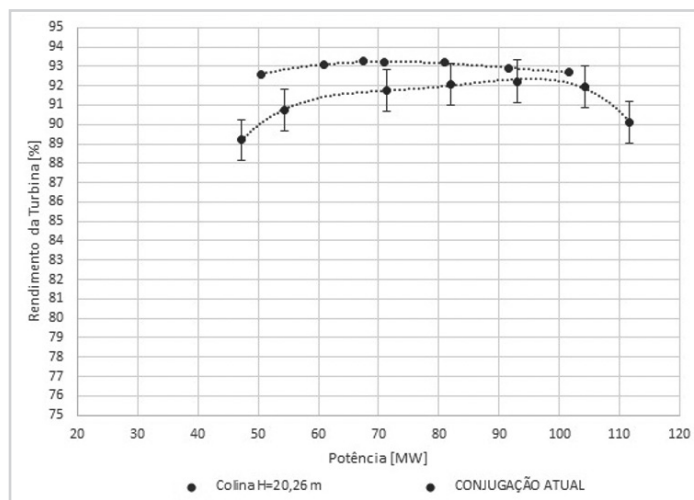


Fig. 9: Potência x rendimento (conjugado). Fonte: Elaboração própria

A partir dos gráficos pode-se concluir que é possível verificar que por uma interpolação de 7 pontos – na conjugação atual – é possível obter uma curva operacional de rendimento absoluto com o mesmo perfil extraído da colina da máquina, para uma referência de queda líquida de 20,26 m, do qual os dados foram transpostos. Entretanto, pela figura é possível observar que somente a partir de 80 MW, considerando as incertezas, que temos uma aproximação dos valores obtidos com os projetados. No caso específico dessa máquina, a curva de geração obtida foi a mesma que as das demais máquinas da usina.

Considerações sobre as possibilidades do monitoramento contínuo da vazão:

Tendo em vista que o período escolhido para o levantamento dos dados, de 20/12/2016 a 25/01/2017, verificou-se uma grande variação da carga, típico dessa época do ano em razão de feriados, o que foi possível avaliar o comportamento da vazão turbinada medida e por via de consequência, a produtibilidade, da UG 09.

Através da massa de dados analisada, pode-se observar que para faixas de operação entre 50 e 80 MW, representada por 40% do universo dos dados, a vazão turbinada medida foi bem próxima ao valor tabelado da usina, que é função da queda bruta e da geração. Para as demais faixas de operação, de 80 MW a 110 MW, as vazões turbinadas medidas apresentam variações de até 6,86% em relação aos valores teóricos tabelados.

Portanto, a diferença entre valores medidos e tabelados pode implicar fortemente nas divergências entre planejamento e operação, fazendo com que o armazenamento ao final do período de operação fique bem abaixo daquele armazenamento esperado ao final do período de planejamento.

CONCLUSÕES

Durante o projeto desenvolveram-se diversos estudos relacionados às dificuldades e particularidades de medição de vazão nas turbinas axiais Kaplan da UHE Porto Primavera, obtendo-se definições para a tomada de decisões acerca dos procedimentos a serem seguidos.

Devido às condições físicas do fluxo no tubo de sucção da Unidade Geradora UG 14, mostrou-se inviável a análise qualitativa dos sinais acústicos da instalação experimental realizada (a jusante da turbina).

Por outro lado, a instalação de transdutores nas paredes das três seções de adução da Unidade Geradora UG 09 teve êxito, possibilitando definir como instalação definitiva 8 caminhos



ultrassônicos em cada uma das 3 seções (16 transdutores por seção), obtendo-se medição de vazão em tempo real com precisão com um total de 48 transdutores.

Confronta-se com sucesso as definições em norma [1,2] desse tipo de aplicação onde se requer 18 caminhos ultrassônicos por seção (108 transdutores no caso desta turbina) para se obter medição precisa da vazão.

Na avaliação do rendimento da turbina da Unidade Geradora 09 da UHE Porto Primavera, observou-se que é necessária uma maior análise dos parâmetros de operação da máquina, pois as curvas de rendimento por vazão e potência apresentaram discrepâncias com a curva de colina para a faixa operativa da máquina, indicando perda de eficiência em relação ao modelo.

Os desvios encontrados possivelmente foram agravados pela incrustação do mexilhão dourado na adução da turbina, o que deve ser analisado futuramente. Tratando-se de uma máquina hidráulica de baixa queda, perdas hidráulicas na ordem de poucos centímetros acarretam em grande influência sobre a eficiência do processo.

As informações atualizadas podem contribuir imensamente com a gestão de outras centrais pertencentes à cascata, ampliando os benefícios da pesquisa realizada.

A aplicação desta metodologia de análise permitirá à geradora gerenciar de forma otimizada seus insumos e avaliar medidas corretivas em seu equipamento, visando atingir maior rendimento em sua geração e entrega de energia.

Também pode-se concluir que a metodologia de instalação dos medidores ultrassônicos, com redução de caminhos, contribui em muito para a evidência da viabilidade técnica e econômica da mesma em turbinas axiais tipo Kaplan e Bulbo, em âmbito nacional e mundial, comprovando a aplicabilidade do produto do projeto.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASME TECHNICAL COMMITTEE, American Society of Mechanical Engineers. 1992. "ASME PTC 18: Hydraulic Turbines and Pump-Turbines." Consolidation of ASME PTC 18-1992 and ASME PTC 18.1-1978, 1992.
- IEC TECHNICAL COMMITTEE - TC 4 - Hydraulic turbines. 1991. International Code for the Field Acceptance Tests of Hydraulic Turbines. Appendix J - ACOUSTIC METHOD OF DISCHARGE MEASUREMENT International Standard IEC 41. CEI/IEC 41: 1991. Geneva, Switzerland.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. Disponível em <<http://www.ons.org.br>> Acesso em 18 de março de 2015.
- BRUNETTI, Franco; Mecânica dos Fluidos. 2 ed. São Paulo. Pearson Prentice Hall, 2008
- RENNOSONIC TECNOLOGIA LTDA. Medição de vazão. 2009. Disponível em: <<http://www.renno.com.br/rennosonic/Pagina.do>>. Acesso em: 16 ago. 2014.
- SOUZA, Z. E BORTONI, E.C. 2006. Instrumentação para sistemas energéticos e industriais. Ed. do autor. Itajubá-MG, 2006.
- KOWALSKI, E. L., e S. C. KOWALSKI. "Revisão sobre os métodos de controle do mexilhão dourado em tubulações" Revista Produção. ISSN 1676 - 1901 / Vol. 8/ Num. 2/ Julho/2008 de 2008.
- SANTOS, Cintia Pinheiro dos. Desenvolvimento de metodologia para controle das larvas de *Limnoperna fortunei* com o uso de radiação ultravioleta e seus impactos sobre *Microcystis aeruginosa* potencialmente presentes na água superficial. 2011. 83. Tese (Doutorado em Ecologia). Instituto de Biociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011
- RABALAIS, R. A. "Ultrasonic Flow Measurement: Technology and Applications in Process and Multiple Vent Stream Situations." Proceedings of the Texas A&M Symposium., 2002
- RAMOS, R. Desenvolvimento de medidor de vazão de gás por ultra-som. Universidade Federal do Espírito Santo, PPGMEC-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. 2006.
- SAMPAIO, P. A. B, J. L. H. FACCINI, e J. SU. "Numerical simulation of an ultrasonic flowmeter for measurement of two-phase gas-liquid stratified flow." Proceedings of 19th International Congress of Mechanical Engineering. ABCM, Brasília. Brasil, 2007.
- MATHIAS, R. B. "Influência do perfil de velocidade do escoamento sobre a medição ultrassônica de vazão por tempo de trânsito" Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Espírito Santo. 98 f., 2010.
- WALSH, JAMES – Chairman da ASME PTC-18, International Electro-technical TC-4 chief technical advisor pelos Estados Unidos (IEC 60041).
- BEED, ROBERT H. Flowmeter Services (EUA) .
- IEC - INTERNATIONAL ENGINEERING CONSORTIUM. 60041: Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines. Genebra, Switzerland 1991.
- PEREIRA, M. Flow Meters: Part 1, vol. 1, IEEE, 2009, pp. 18-26.
- FERREIRA, A.L.A.S., TECNOLOGIA ULTRASSÔNICA NA MEDIÇÃO DE VAZÃO EM ESCOAMENTOS INCOMPRESSÍVEIS, PHD Tesis PUC RJ, Rio de Janeiro, 2010.
- DYNASONICS. Dynasonics ultrasonic flow meters, Website. Disponível em: https://loewener.dk/wp-content/files/5265_01_dynasonics_uf_dynasonics_ub_02_0635.pdf. Acesso em: 20/02/2015.
- KOIKE, Y. K. H., WADA, S., TAISHI, T., ARITOMI, M. e MORIKOI, M., "Optimum Distribution of Cavitation Bubbles for a flow rate measurement using Ultrasonic Doppler Method," Ultrasonic, vol. 2, 2003.

Acknowledgements

O presente artigo contempla o trabalho desenvolvido e resultados alcançados relativos ao Programa de P&D ANEEL: PED-0061-0044/2014, sendo a empresa proponente: CESP (Companhia Energética de São Paulo), e as empresas executoras: Rennosonic Tecnologia Ltda. e Hedaidi Engenharia Ltda. O projeto se encerrou em 31/01/2017