

Sistema de Aferição e Gestão Hidroenergética para Melhoria da Produtividade em Aproveitamentos Hidroelétricos

Vitor R.M. Pamplona¹, Gustavo F. Souza¹, Luis A.C. Paschoalotto², Mírian A. R. R. C. Pinto³

Resumo – Na última década tornou-se mais presente o conceito de aproveitamentos a "fio-d'água", onde mais intensamente foram inseridas as turbinas de potencial hidrocínético - Kaplan e Bulbo. Nessas máquinas hidráulicas a vazão é um parâmetro de difícil mensuração, porém é o mais importante parâmetro para a gestão operacional. O presente artigo vem mostrar os resultados da avaliação de viabilidade técnica da implementação de metodologias de alta exatidão, para se determinar a eficiência energética de aproveitamentos hidrelétricos. Por meio do método Acústico por Tempo de Trânsito foi realizada medição da vazão turbinada pelas máquinas, em configurações físicas e sistemáticas inéditas no Brasil. A informação precisa de valores de vazão, permitirão que a equipe de operação da usina opere melhor suas unidades geradoras, e ofereça ao sistema a possibilidade de se operar a UHE Porto Primavera de uma forma ótima e equilibrada com os demais aproveitamentos hidrelétricos existentes na bacia do Rio Paraná.

Palavras-chave – Método acústico. Planejamento energético. Turbinas Axiais. Vazão.

I. INTRODUÇÃO

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, conseqüentemente, grande vazão turbinada. Como particularidade regional, esse aproveitamento hidrelétrico sofre influência da proliferação da praga denominada "Mexilhão Dourado", um molusco que, pela aglomeração, provoca diversos tipos de problemas operacionais nos sistemas de escoamento da turbina: adução principal, grades, tubos de resfriamento, etc.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico -ONS- tem um sistema de despacho que opera as usinas baseado, principalmente, em níveis d'água, que compõem o equacionamento tanto da capacidade de geração das plantas quanto do

armazenamento de energia, no espaço e no tempo. Entretanto, as metodologias utilizadas para medir a capacidade de geração e de armazenamento vêm sendo questionadas quanto à exatidão sobre a real capacidade de geração hidrelétrica do sistema.

A produtibilidade é um fator característico de cada usina que quantifica a energia produzida em função principalmente, da queda bruta da usina. Por meio da produtibilidade é possível saber quantos metros cúbicos de água são necessários para gerar um megawatt de energia a uma determinada queda bruta.

A confiabilidade da produtibilidade de uma usina é primordial para que se faça uma operação e planejamento do sistema bem refinado. O programa de geração, enviado para o ONS diariamente, é feito pelo agente de geração com base na disponibilidade hídrica da usina e na energia que o sistema elétrico necessita para atendimento à carga. Para o programador definir a quantidade de energia que ele tem disponível para gerar, ele conta com previsões de afluência, nível do reservatório e um simulador hidráulico que realiza os cálculos com base na produtibilidade da usina nessas condições. Qualquer imprecisão nesse valor poderá acarretar em sobra ou déficit de água no reservatório ou um desvio na energia gerada.

Diferentemente do que acontece na maioria dos países, grande parte das Usinas Hidrelétricas do Brasil não possuem uma medição precisa em tempo real da quantidade de água utilizada na geração de energia elétrica. A carência deste tipo de medição implica em falta de informação confiável para as empresas geradoras e, conseqüentemente, para o Sistema Interligado Nacional.

É de essencial importância a medição da vazão turbinada de tal forma que se possa fazer tanto um melhor planejamento de médio e curto prazo, quanto um programa diário de geração, e assim prever de forma mais assertiva o armazenamento nos subsistemas (planejamento) e os níveis dos reservatórios (programação diária).

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.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do IX Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (IX CITENEL).

¹Vitor R.M. Pamplona e Gustavo F. Souza trabalham na Rennosonic Tecnologia Ltda. (e-mails: vitor@rennosonic.com; gustavo@rennosonic.com).

²Luis A.C. Paschoalotto trabalha na CESP (Companhia Energética de São Paulo) (e-mail: luis.paschoalotto@cesp.com.br)

³ Mírian A. R. R. C. Pinto trabalha na Hedaidi Engenharia Ltda. (e-mail: mirian.hedaidi@gmail.com)

II. OBJETIVOS

Os principais objetivos são:

- desenvolver uma metodologia para viabilizar tecnicamente a aplicação de medidores ultrassônicos, para monitoramento de vazão, em turbinas hidráulicas do tipo Kaplan, extensivo às máquinas do tipo Bulbo, que possuem várias seções de tomada de água para uma mesma caixa semi-espiral;
- avaliar qualitativamente o desempenho da instalação de instrumentação para medição de vazão turbinada no tubo de sucção da Turbina Kaplan;
- avaliar a eficiência da instalação de medidores ultrassônicos, para monitoramento de vazão, entre as regiões de entrada e saída da turbina hidráulica (caso possível mensurar a eficiência na saída), cujas características são atípicas para a aplicação desses medidores, ou seja, em trechos com seções não uniformes.
- avaliar o rendimento de uma turbina da UHE Porto Primavera, obtendo-se os valores de vazões com medição em tempo real, o que possibilitará o levantamento da curva real de rendimento da turbina hidráulica, para comparação com a curva de projeto da máquina (modelo- protótipo);
- fornecer dados de medição de vazão em tempo real, como insumos para uma melhor análise e gestão operacional da Usina que possibilite ações de curtíssimo, curto, médio e longo prazo, voltadas para o melhor uso da água por parte da CESP e do Sistema Interligado Nacional – SIN.

III. METODOLOGIA

O projeto se caracteriza como pesquisa aplicada, tendo como base pesquisa bibliográfica acerca das particularidades dos temas trabalhados. É uma pesquisa exploratória visto o caráter inédito de seus objetivos. São aplicados métodos conhecidos de medição de vazão de formas inovadoras, e seus resultados, avaliados, podem indicar uma mudança nos resultados do planejamento energético de operação de curto e médio prazo, tanto da geradora em questão quanto do SIN.

O método acústico de medição de vazão por ultrassom, 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.

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

Foram instalados medidores ultrassônicos nos três vãos de entrada da tomada d'água de uma turbina hidráulica da UHE Porto Primavera (UG 09), 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, conforme será apresentado na seção IV, subseção I).

Sob o ponto de vista de inovação, 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.

O sistema de aquisição de dados de vazão selecionado para aplicação no projeto é o transmissor de vazão Caldon Hydro™ LEFM® 880, consolidado mundialmente na medição de vazão de óleo, gás e água. As tabelas I e II a seguir mostram a especificação desse sistema e seus transdutores.

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 I – Especificações técnicas do Sistema de medição de vazão

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

Além do monitoramento mais efetivo, a medição poderá levantar uma nova curva de produtividade da usina em função da queda bruta (e atualização da curva colina). Podem ocorrer comportamentos diferentes do previsto no projeto da turbina e faixas de operação bem distintas que podem implicar na mudança da a filosofia de operação.

Tabela II - 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

As figuras 1a e 1b mostram os equipamentos utilizados.



Figura 1a - Transdutores omnidirecional do tipo "Eyeball" Caldon HydroTM - CAMERON. Fonte: acervo próprio



Figura 1b - Medidor de vazão ultrassônico modelo LEFM® 880 Series - Caldon HydroTM - CAMERON. Fonte: acervo próprio

IV. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A. Planejamento energético da UHE Porto Primavera

A UHE Porto Primavera está localizada no final da cascata da Bacia do Rio Paraná e recebe, obrigatoriamente, as águas das bacias dos rios Grande, Paranaíba e Tietê que possuem diversos reservatórios de outras hidrelétricas. Mesmo sendo Porto Primavera uma usina a fio d'água, esses armazenamentos a montante se comportam como reservatórios de Porto Primavera, e por isso a energia armazenada considera a energia que tais águas poderão gerar também em Porto Primavera. O diagrama esquemático da figura 2 ilustra a localização da UHE Porto Primavera (PPR), antes de Itaipu, que não recebe apenas água do rio Paranapanema.

Como exposto, a produtibilidade é um fator característico de cada usina que quantifica a energia produzida em função, principalmente, da queda bruta da usina. Geralmente, esse dado vem do projeto da usina, do modelo reduzido ou dos testes durante o comissionamento. Ao passar dos anos, a usina sofre desgastes naturais e modificações com troca de equipamentos ou modernizações e esse valor pode perder sua veracidade.

Nos dados cadastrais da UHE Porto Primavera está declarada uma produtividade específica de 0,009133 MW/m³/s/m e uma queda específica de 18,95 m. Com isso, essa usina possui uma produtibilidade de 0,1781 MW/m³/s, ou seja, para cada metro cúbico de água que passa pela turbina gera-se 0,1781 MW.

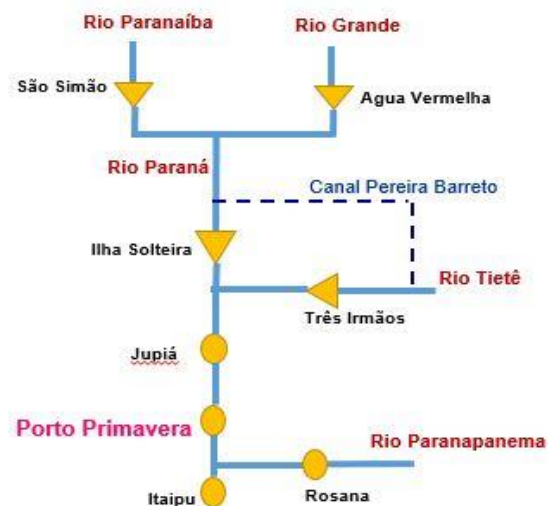


Figura 2 - Diagrama esquemático das usinas da cascata da Bacia do Rio Paraná. [Adaptado de 3]

A informação da produtibilidade de uma usina é importante para que se tenha uma operação e planejamento do sistema otimizado. O programa de geração, enviado ao Operador Nacional do Sistema Elétrico diariamente, é feito pelo agente de geração com base na disponibilidade hídrica da usina e na energia que o sistema elétrico necessita. Valores imprecisos de produtibilidade implicam em sobra ou déficit de água no reservatório ou um desvio na energia gerada.

Caso haja um erro no valor da produtibilidade da usina a montante, a previsão de afluência da usina a jusante poderá ficar comprometida, justamente pelo desvio entre o valor informado da defluência, que foi calculada com base na geração programada da usina e na produtividade, e a vazão efetivamente ocorrida. Isso pode levar a um descompasso na operação da cascata e ocasionar desvios entre a geração programada e verificada, em razão de se procurar manter o nível do reservatório daquela usina que foi prejudicada pela informação de uma variável que não correspondia à realidade.

Um valor incorreto da produtibilidade compromete o planejamento do setor elétrico. Os modelos computacionais NEWAVE e DECOMP, que fazem o planejamento de médio e curto prazo do SIN utilizam a produtibilidade para fazer os cálculos na otimização dos recursos energéticos disponíveis, para garantir um custo ótimo de operação e o suprimento energético durante todo o horizonte do planejamento.

No modelo de otimização a produtibilidade acumulada é uma variável muito importante na tomada de decisão, já que o modelo preferirá gerar em uma cascata onde o metro cúbico de água produza a maior quantidade de energia. Isso maximiza a produção de energia e minimiza o consumo de água. Caso as produtibilidades das usinas da cascata tenham

desvios em relação aos valores reais, os desvios de quantidade de água e geração podem acumular erros e comprometer todo o processo de otimização do sistema. Tal erro também causará impacto no preço da energia, além de comprometer toda a segurança de suprimento energético do país, uma vez que não se conhecerá exatamente a quantidade de energia disponível para se gerar nem a quantidade de água que será utilizada para atender uma determinada carga, comprometendo a projeção de armazenamento energético.

B. Estudo de caso

Por meio do modelo DECOMP, realizou-se um estudo para avaliar os impactos e desvios no planejamento de curto prazo considerando alterações da produtividade da UHE Porto Primavera, para um valor 5% inferior e 5% superior, em relação ao valor oficial utilizado pelo setor elétrico.

Para esse estudo foi utilizado como caso base o caso oficial do PMO de março 2015 revisão 0 do modelo DECOMP (com 5 semanas operativas – de 28/02 a 03/04).

Nos casos para a análise de sensibilidade foram feitas apenas a alteração nos dados cadastrais da UHE Porto Primavera no valor da produtividade, reduzindo 5% e acrescentando 5% do valor original. Para processar os casos adotou-se o modelo DECOMP versão 21 Linux.

Os valores de produtividade (MW/m³/s) informados ao modelo estão apresentados na tabela III:

Tabela III - Produtividade da UHE PPR para os estudos de caso. Fonte: Elaboração própria

Caso	Produtividade Específica
Base	0,1731
5% Inferior	0,1644
5% Superior	0,1818

Dos resultados obtidos, apresenta-se a seguir (ver tabela IV) os valores para a primeira semana operativa, de geração da usina, geração da cascata toda (42 usinas) e Custo Marginal de Operação para o Subsistema Sudeste/Centro-Oeste.

Tabela IV – Resultados do Estudo de caso. Fonte: Elaboração própria

Caso	CMO [R\$/MWh]	PPR [MWmed]	Cascata [MWmed]
Base	1276,33	912	8640
5% Inferior	1281,11	871	8608
5% Superior	1269,41	972	9704

Os resultados se mostraram coerentes, pois se considerar uma produtividade mais baixa, a tendência é que a usina gere menos energia por ser menos eficiente e, por gastar mais água, o custo de operação tende a ficar mais alto. O inverso também pode ser notado, já que uma usina mais eficiente gera mais energia e o custo tende a cair. Como a água que alimenta Porto Primavera é proveniente também das usinas a montante, nota-se que há uma perda de energia na cascata ao tornar Primavera menos eficiente e há um ganho de geração ao tornar a usina mais eficiente. Isso mostra que a produtividade em Porto Primavera afeta toda a produtivi-

dade acumulada na cascata e na decisão de operar e planejar o sistema.

C. Definição e medição de vazão

Define-se vazão em volume Q como o volume de fluido que atravessa uma certa seção do escoamento por unidade de tempo” [4]. Fazendo o equacionamento desta definição, a vazão de um fluido, seja ele gasoso ou líquido, pode ser representada pela equação 1:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (1)$$

Em que Q é a vazão [m³/s]; V é o volume [m³]; t é o tempo [s].

A medição da vazão de um fluido depende de algumas características como calor específico, viscosidade, valor de Reynolds, distribuição de velocidade e tipo de regime no duto (laminar ou turbulento), pressão e temperatura.

Desde 1502 Leonardo da Vinci observava que em um determinado espaço de um rio, passa a mesma quantidade de água, independente da profundidade, largura, tipo de curso d'água, velocidade e outros. Porém, o desenvolvimento de estudos, precisão de dados, e projetos de equipamentos só foram concretizados com estudos posteriores de Bernoulli e Pitot.

D. Comparação entre os métodos mais utilizados

O método que foi há algum tempo referência, e por isso o mais confiável, era o método Winter – Kennedy, porém após inúmeras pesquisas e estudos verificou-se que o método ultrassônico apresenta exatidão e precisão superiores.

As figuras 3 e 4 mostram a mesma unidade geradora analisada com os dois métodos citados.

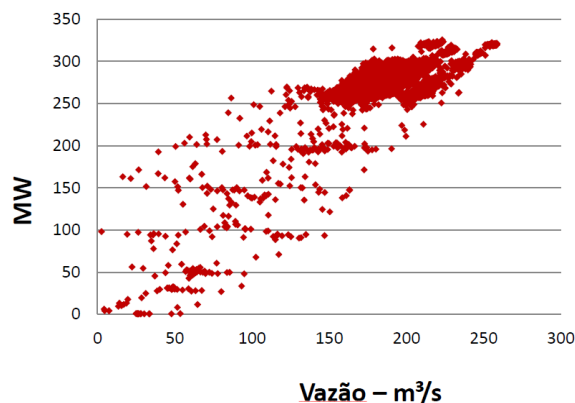


Figura 3 - Potência x Vazão – Método Winter-Kennedy [5]

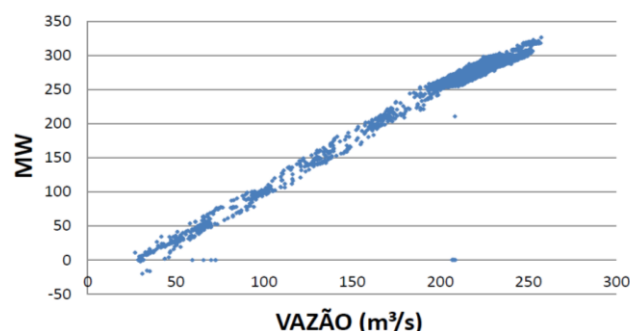


Figura 4 - Potência x Vazão – Método Ultrassom [5]

O método ultrassônico permite a melhor regulação da máquina de modo que ela trabalhe de forma mais eficiente.

Na figura 5 é possível comparar a diferença entre as curvas de rendimento de uma turbina.



Figura 5 - Curvas de Potência x Rendimento medidas pelos métodos Winter-Kennedy e Ultrassônico [5]

E. Conceitos básicos acerca do Método de medição de vazão por tempo de trânsito

O método 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 segue (ver equações 2 e 3) [6]:

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

$$Q = \frac{\pi \cdot D \cdot v_s^2 \cdot \tan \theta}{8} \cdot \Delta T = k \cdot \Delta T \quad (3)$$

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.

F. Avaliação do local de instalação

A figura 6 mostra o fluxograma da avaliação do local ideal de instalação do sistema de medição de vazão permanente.

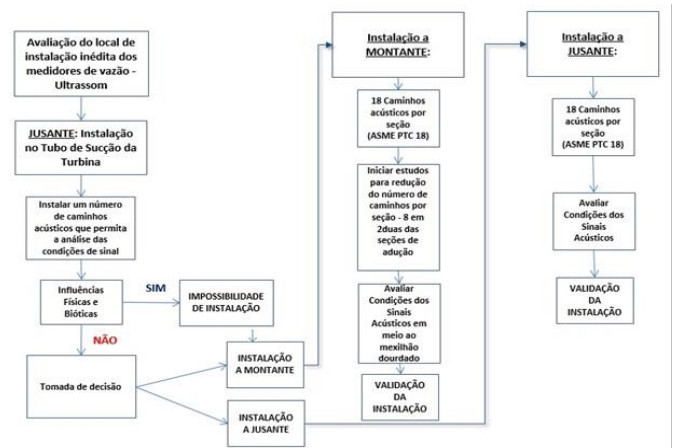


Figura 6 - Avaliação de local de instalação. Fonte: Elaboração própria

A partir dessa avaliação, iniciou-se a etapa de instalação experimental a jusante, cujo sucesso ou insucesso definiria o local de instalação definitivo.

G. Impactos da proliferação do Mexilhão dourado

Os problemas causados pela presença de espécies exóticas no Brasil têm sido alarmantes e não tem sido diferente em plantas geradoras de energia elétrica. A parte mais afetada economicamente é o turismo e piscicultura, pois não há alternativas de controle para essas áreas. A produção energética também é afetada com a presença dos moluscos, mesmo com recursos de controle temporário. Os mexilhões invadem as máquinas, obstruindo canais, entupindo filtros e diminuindo a capacidade produtiva da usina.

Depois de quase 10 anos que se iniciou uma força tarefa nacional, os agentes geradores já conseguem conviver com o mexilhão, já que ele não tem interferido na geração de energia. O maior problema nas usinas hidrelétricas é a presença do molusco no sistema de refrigeração, porém hoje, está controlado.

O mexilhão é extremamente robusto e tolera com facilidade variações no pH, temperatura e outros parâmetros. Suporta ambiente com até 3% de salinidade e resiste a um período de até dois meses em estado de inanição, ou seja, enfraquecido. Sua única necessidade são águas ricamente oxigenadas, mas consegue viver também em águas poluídas e contaminadas.

Danos causados pela espécie exótica são conhecidos como poluição biológica, com destaque para:

- Obstrução de tubulações, canos e dutos de água, esgoto e irrigação;
- Entupimento de sistemas filtragem e de refrigeração dos equipamentos necessários para a geração de energia elétrica, causando interrupções frequentes para limpeza, encarecendo a produção;
- Aumento da perda de carga causada pela incrustação dos moluscos às grades nas tomadas de água, fazendo com que haja diferença nas vazões teóricas e reais, que são utilizadas para escolha da faixa de operação da Unidade Geradora. Embora seja pequena, há a possibilidade de redução no engolimento na grade protetora da caixa adutora;
- Diminuição da seção útil das tubulações;

- Redução da velocidade de escoamento das águas em tubulações;
- Aumento da corrosão de materiais como tubulações, grades e válvulas.

Verificada a existência do molusco nas seções de adução e nas seções a jusante da turbina, avaliou-se o comportamento da incrustação do molusco na face dos transdutores instalados, com resultados empíricos satisfatórios, onde em pelo menos 6 meses após a instalação a montante, não houve o menor sinal de perda do sinal acústico do sistema de medição de vazão ultrassônico devido a incrustação. Apoiado em estudos relacionados ao combate ao molusco através de emissão de ultrassom e vibração [7, 8], em um primeiro momento conclui-se que o pulso ultrassônico dos transdutores (500Hz) está agindo de forma preventiva à incrustação.

H. 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. Este fator foi discutido e foi sugerida a superposição de diversos pulsos ultrassônicos a fim de se obter um sinal acústico representativo para o cálculo do tempo de trânsito.
- 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 7 representa a influência da turbulência no caminho acústico.

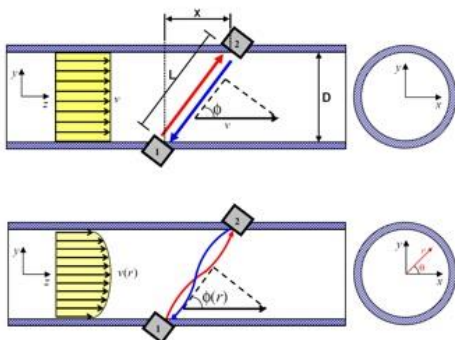


Figura 7 – Caminho acústico em escoamento laminar (topo) e turbulento. [12]

O resultado desse estudo traria maior confiabilidade na configuração do sistema para serem filtrados os fatores que influenciariam na precisão da leitura.

1) Instalação experimental - jusante

Essa etapa foi realizada no tubo de sucção da UG 14, no mês de junho de 2015, e teve como objetivo a avaliação qualitativa dos sinais ultrassônicos nesse ambiente.

Para a definição dos pontos de instalação onde se teriam melhores chances de obtenção do sinal ultrassônico, contou-

se com o auxílio do consultor internacional *James Walsh* – que participou no projeto nas etapas de definição e instalação experimental; *Chairman* da ASME PTC-18, *International Electro-technical TC-4 chief technical advisor* pelos Estados Unidos (IEC 60041).

Decidiu-se instalar 3 caminhos ultrassônicos na seção direita a jusante da turbina.

As figuras 8 e 9 mostram, de forma esquemática, como se deu essa instalação.

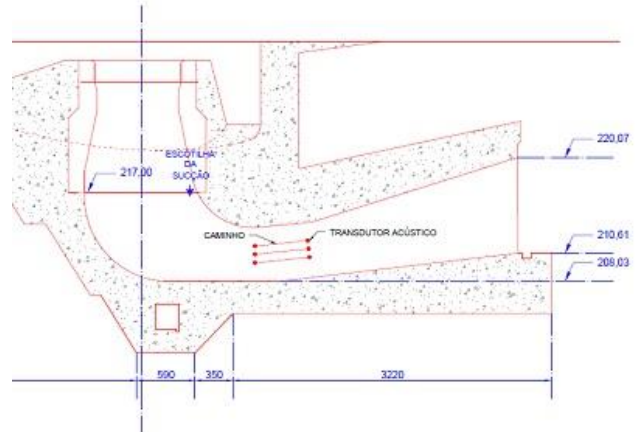


Figura 8 – Corte longitudinal do tubo de sucção. Fonte: Elaboração própria

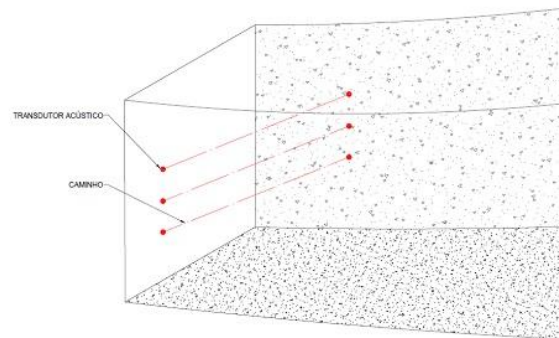


Figura 9 - Detalhamento de uma das duas seções de saída do tubo de sucção. Fonte: Elaboração própria

Devido às dificuldades no acesso aos locais de instalação, o único ponto de acesso para os cabos seria abaixo do tubo de sucção. 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 (ver figuras 10 a 12).



Figura 10 – Bifurcação de saída do tubo de sucção e grelha de escoamento. Fonte: Acervo próprio



Figura 11 - Transdutores instalados. Fonte: Acervo próprio



Figura 12 - Transposição de cabos e vedação da válvula. Fonte: Acervo próprio

Terminada a instalação experimental, foi realizada a tentativa de coleta dos dados de vazão com o sistema de aquisição de dados.

Ao se partir a 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.

A inspeção na infraestrutura de passagem e proteção dos cabos (canaletas) mostrou que houve um rompimento dos cabos dentro da tubulação de drenagem do Tubo de Sucção, durante um dos sincronismos da UG 14, ocasião em que o vórtice gerado distribui muita energia cinética, ocasionando uma tensão axial nos cabos maior do que o suportado em projeto.

Portanto, houve impossibilidade de se concluir acerca dos sinais na instalação experimental, a jusante. Dessa forma, foi descartada a viabilidade 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.

2) Instalação permanente - Montante

Essa etapa, realizada na UG 09, em abril de 2016, contou com a participação do especialista Eng. *Robert H. Beede*, consultor da empresa *Flowmeter Services* (EUA) – que possui vasta experiência no campo de medição de vazão por ultrassom – que realizou as 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 andaimes

para instalação, e a instalação da instrumentação e infraestrutura referente à seção central da adução da UG 09, denominada Baía B.

Após o encerramento da instalação na Baía B, optou-se por fazer a instalação na seção direita e esquerda a montante da adução da UG 09, denominadas respectivamente, Baía C e Baía A.

A figura 13 mostra um esquema dos pontos de instalação dos transdutores.

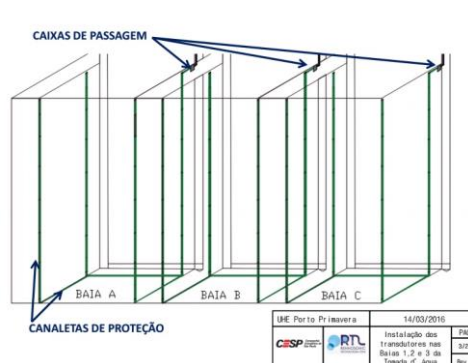


Figura 13 - Esquema das instalações de 8 e 18 caminhos ultrassônicos. Fonte: Elaboração própria

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

Avaliando-se as 3 seções de adução, verifica-se que normalmente a Baía A possui escoamento mais turbulento, diferenciado, sendo necessária uma avaliação mais elaborada da vazão nessa seção. Escolheu-se então a Baía 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 14 mostra os medidores de vazão instalados, sendo posicionados da esquerda para a direita: Baía B, Baía A e Baía C. A figura 15 mostra os transdutores instalados em uma das três baías com indicação da comunicação entre os transdutores.



Figura 14 – Medidores de vazão instalados, em fase de acabamento. Fonte: Acervo próprio

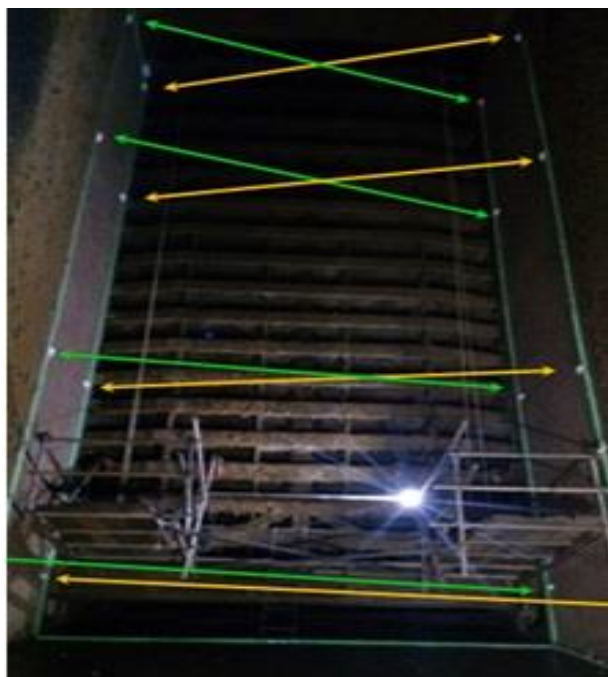


Figura 15 – Transdutores já instalados na Baía C (16 transdutores) e representação gráfica da comunicação entre os transdutores. Fonte: Acervo próprio

Finalizada a instalação dos transdutores, realizou-se a inicialização do sistema descrita na subseção I seguinte.

Para a instalação, foram utilizados andaimes modulares, possibilitando mobilidade entre os pontos de instalação.

I. Inicialização do sistema

Nessa etapa, realizada em julho de 2016, foi feita a configuração inicial da seção de adução A da Unidade Geradora UG 09 com 18 caminhos ultrassônicos, e feito um comparativo entre os dados obtidos com 18 caminhos e 8 caminhos na seção A, a fim de se determinar um fator de desvio entre as medições que tornasse possível a configuração de 8 caminhos definitivamente.

Foram analisados os valores de velocidade do fluxo para 5 patamares de carga (35, 45, 58, 77 e 100 MW), para se determinar um Fator de medição de 18 caminhos, que aplicado a 8 caminhos fornecesse alta precisão na medição.

A tabela V 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 (Baía A B e C), deixando o sistema operacional medindo a vazão em tempo real, a partir desse momento.

A figura 16 mostra os perfis de velocidade com medição de 18 e 8 caminhos, mostrando que a tendência se mantém coerente.

A figura 17 mostra a qualidade dos sinais obtidos via interface software com o sistema.

Tabela V – 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			

Perfil de Velocidade 18 x 8 caminhos - 100MW

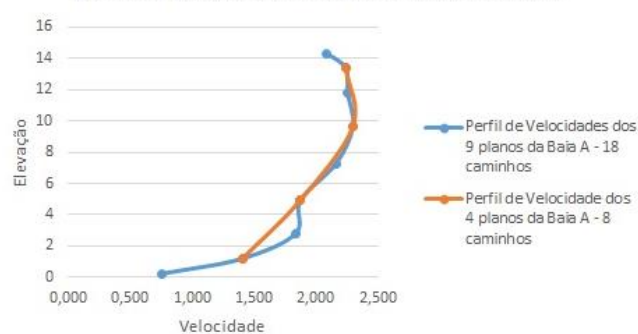


Figura 16 – Comparativo entre o perfil de velocidade no escoamento, medidos com 18 e 8 caminhos ultrassônicos. Fonte: Elaboração própria



MAIN

DATA

HEALTH

CONFIGURATION

Path Diagnostic Data

	Path 1	Path 2	Path 3	Path 4	Path 5	Path 6	Path 7	Path 8
TDown (ns)	5056450.0	5053130.0	5005319.5	5003474.5	4974652.0	4964709.5	4934432.0	4917796.0
DeltaT (ns)	5760.0	5368.0	4269.9	3108.6	4596.0	4148.6	3348.2	2202.6
Reject (%)	0	0	0	0	0	0	0	0
SNR Up	90	90	92	88	95	91	88	90
SNR Dn	82	84	87	88	87	91	90	93
Gain Up (dB)	31.6	31.7	31.4	31.2	30.0	29.6	30.2	30.9
Gain Dn (dB)	29.3	29.8	30.4	30.0	31.9	31.1	31.2	31.1
Status	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal

Data Quality States (Path Events)

No Signal	■	■	■	■	■	■	■	■
Low SNR	■	■	■	■	■	■	■	■
High Gain	■	■	■	■	■	■	■	■
Bad Waveform	■	■	■	■	■	■	■	■
Bad DeltaT	■	■	■	■	■	■	■	■
Unstable DeltaT	■	■	■	■	■	■	■	■
Unstable Tdown	■	■	■	■	■	■	■	■

Figura 17 – Diagnóstico dos 8 caminhos da Baía A, em configuração definitiva. Fonte: Extraído do software de interface

Os valores de rejeição de sinais (Reject %) em zero 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.

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 1,2% é possível considerar segura a medição com o número reduzido de caminhos ultrassônicos.

J. Avaliação de rendimento

Nesta etapa, realizada em outubro de 2016, foi realizado um ensaio de rendimento, com medição de vazão por ultrassom com o sistema validado. O objetivo desse ensaio foi avaliar as condições de estabilidade mecânica e análise de rendimento relativo da turbina.

1) Procedimentos

Para a realização do Ensaio foram utilizados instrumentos instalados em pontos de medição da unidade geradora, determinados previamente, e informações extraídas diretamente do painel do Regulador de Velocidades - RV - da UG 09.

Os sinais coletados e locais de medição foram os seguintes:

a) 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.

b) Pressão da entrada da caixa semi-espiral

A pressão da entrada da turbina 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

A pressão de saída da turbina foi medida através de um transdutor de pressão piezoresistivo instalado no bloco de derivação específico para este fim

d) Vazão Relativa Turbinada

A pressão diferencial na caixa semi-espiral foi medida através do transdutor de pressão diferencial, cujas medidas foram utilizadas para a determinação da vazão relativa pelo método Winter-Kennedy.

e) Flutuação de pressão na Escotilha tubo de sucção

A flutuação de pressão na escotilha do 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

A 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

A oscilação de eixo 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 localiza-

dos a montante e à direita da Unidade Geradora, na parte superior dos mancais.

h) Potência Ativa (Sinal do Regulador de Velocidade)

A potência ativa foi extraída 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)

A rotação 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)

A abertura do servo-motor do mecanismo distribuidor 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
- Análise de Sinais: Notebook Dell

2) Execução e 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.

- a) 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).

- b) 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) deve estar 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.

As figuras 18 a 21 mostram os gráficos encontrados para o Rendimento da turbina, em função de Potência e Vazão turbinada.

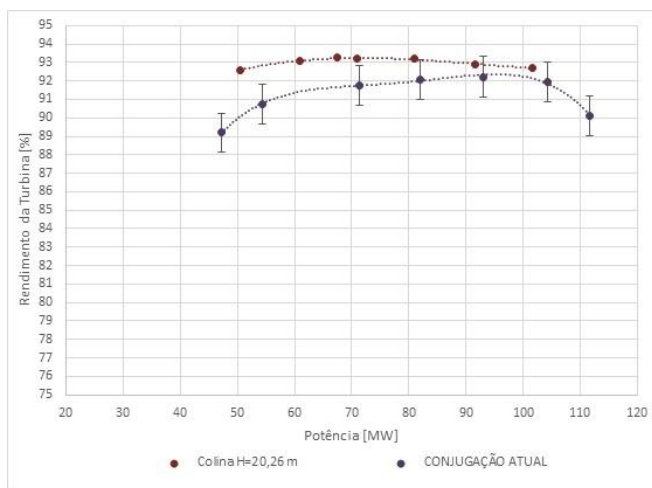


Figura 18 – Potência x rendimento (conjugado). Fonte: Elaboração própria

A partir dos gráficos concluiu-se que é possível verificar que por uma interpolação de 7 pontos – na conjugação atual - temos 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.

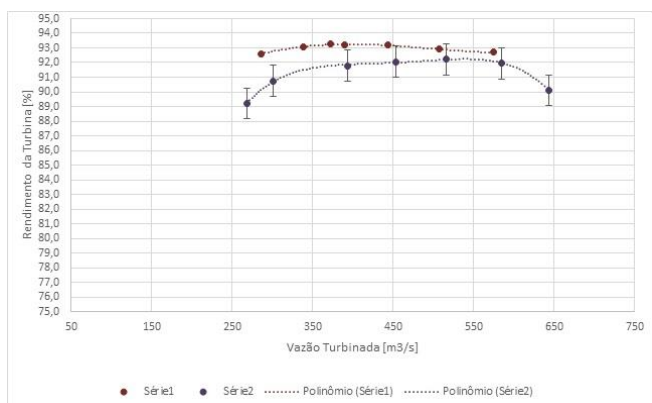


Figura 19 – Vazão por rendimento (conjugado). Fonte: Elaboração própria

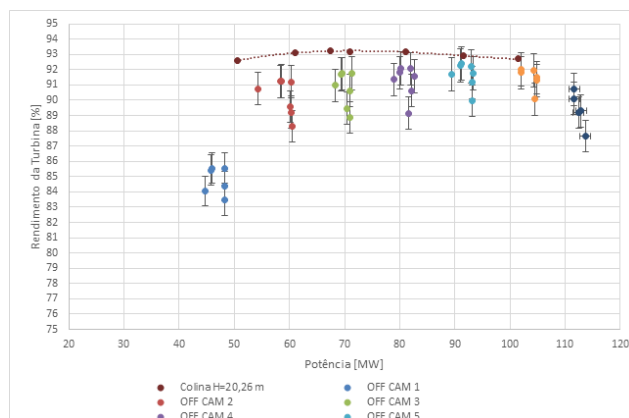


Figura 20 – Potência por rendimento (ensaio – OFF CAM). Fonte: Elaboração própria

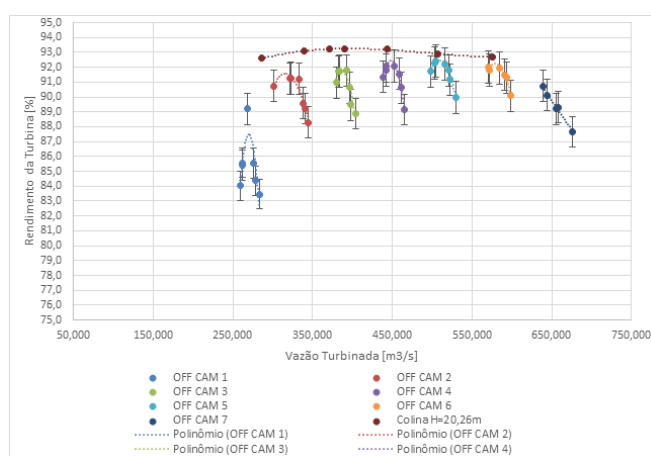


Figura 21 – Vazão por rendimento (ensaio – OFF CAM). Fonte: Elaboração própria

A tabela VI mostra a relação entre os valores de Vazão Turbinada medida e tabelada por faixas de operação

Tabela VI - Relação entre Vazão Turbinada medida e tabelada por faixas de operação. Fonte: Elaboração própria

Faixas de Operação	Q med /Q tab
50 a 59,99 MW	100,10%
60 a 69,99 MW	100,22%
70 a 79,99 MW	101,10%
80 a 89,99 MW	101,57%
90 a 99,99 MW	103,14%
100 a 110 MW	106,86%

A figura 22 apresenta os valores de vazão turbinada, tanto a medida quanto a tabelada, em relação à geração, da UG 09 durante o período avaliado, de 20/12/2016 a 25/01/2017.

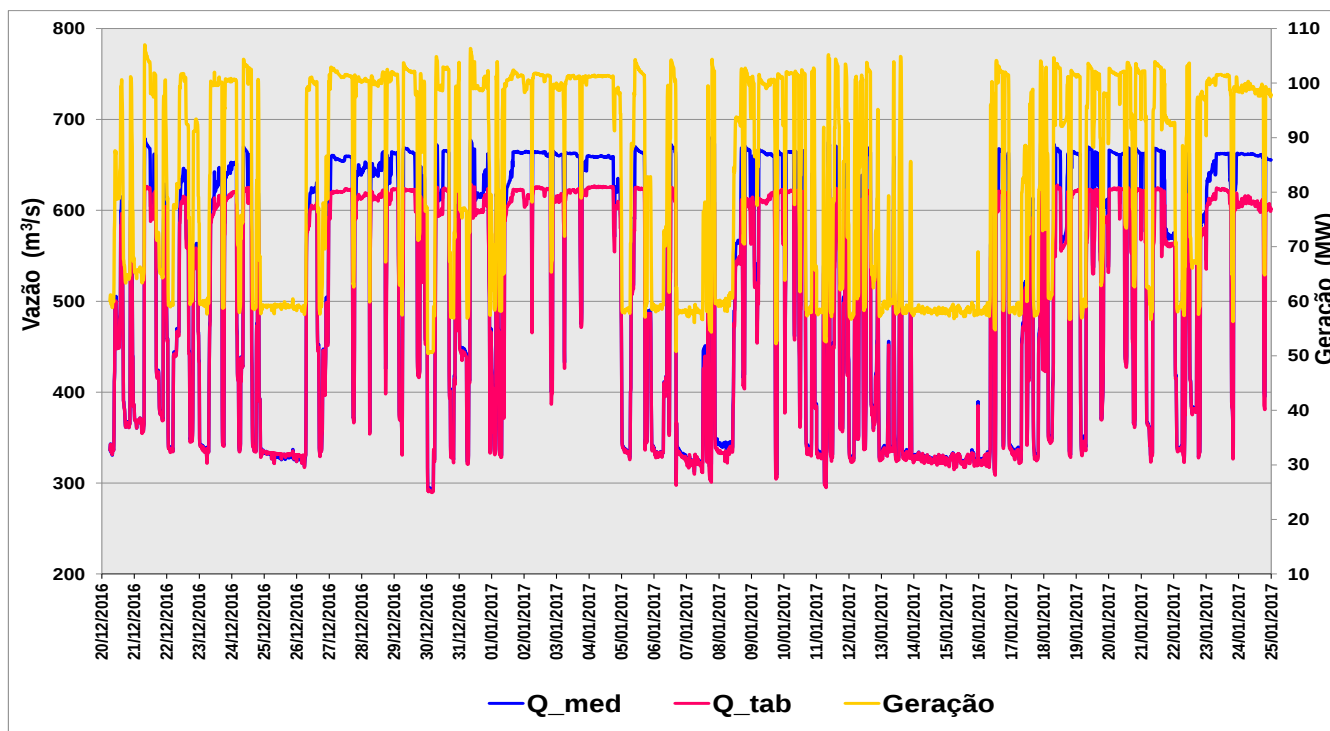


Figura 22 - Variação da vazão turbinada medida e tabelada em relação à geração. Fonte: Elaboração própria

Há que se registrar que esta unidade geradora apresentou o mesmo perfil de geração das demais máquinas da usina.

Considerando o comportamento da produtibilidade mostrada na figura 22 e de acordo com o estudo de caso feito, o planejamento ficaria comprometido utilizando-se os valores de produtibilidade tabelados para valores elevados de geração, ou seja, o armazenamento esperado ao final do período de planejamento seria superior ao armazenamento real ao final do período de operação.

Da mesma forma, se houver necessidade de se atingir ou manter um determinado nível de reservatório, o programa de geração diário elaborado com esses novos valores de produtibilidade, poderá gerar um bloco de energia inferior àquele requisitado.

V. RESULTADOS

A. Planejamento energético

O período escolhido para se avaliar os dados, de 20/12/2016 a 25/01/2017, com grande variação da carga, típico dessa época do ano em razão de feriados, mostrou o comportamento da vazão turbinada medida e por via de consequência, a produtibilidade, da UG 09.

Através da massa de dados analisada, pode-se depreender 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 planejamen-

to 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.

VI. 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 (ver figura 19) possivelmente fo-

ram 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.

Ficou claro, também, que utilizando as informações medidas de vazão turbinada, assim como foi indicado no estudo de caso de planejamento, pode-se ter influência no despacho de geração. Portanto, com mais precisão, é possível aperfeiçoar a gestão energética da planta.

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.

tação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Espírito Santo. 98 f., 2010.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. Disponível em <<http://www.ons.org.br>> Acesso em 18 de março de 2015.
- [4] BRUNETTI, Franco; Mecânica dos Fluidos. 2 ed. São Paulo. Pearson Prentice Hall, 2008
- [5] RENNOSONIC TECNOLOGIA LTDA. Medição de vazão. 2009. Disponível em: <<http://www.renno.com.br/rennosonic/Pagina.do>>. Acesso em: 16 ago. 2014.
- [6] SOUZA, Z. E BORTONI, E.C. 2006. Instrumentação para sistemas energéticos e industriais. Ed. do autor. Itajubá-MG, 2006.
- [7] 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.
- [8] 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
- [9] RABALAIS, R. A. "Ultrasonic Flow Measurement: Technology and Applications in Process and Multiple Vent Stream Situations." Proceedings of the Texas A&M Symposium., 2002
- [10] RAMOS, R. Desenvolvimento de medidor de vazão de gás por ultrassom. Universidade Federal do Espírito Santo, PPGMEC-Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. 2006.
- [11] 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.
- [12] 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.