



TÍTULO: Sistema de detecção e proteção contra vazão anormal no escoamento de água no conduto forçado da unidade geradora U18A de Itaipu

Autores: Nilton S. Ramos Quoirin¹, João Maria Marra¹, Vitor Pamplona²

Empresa: Itaipu Binacional¹ e Rennosonic²

1. INTRODUÇÃO

O projeto das unidades geradoras da Usina Hidrelétrica de Itaipu - UHI foi dotado originalmente de fechamento automático de emergência da comporta de serviço da tomada d'água dos condutos forçados somente por sobrevelocidade na rotação da unidade geradora, detectada por um dispositivo mecânico localizado na tampa da turbina das unidades.

Em função do acidente ocorrido na usina russa de Sayano-Shushenskaya em 2009, considerando a possibilidade de falha ou indisponibilidade do referido dispositivo de detecção de sobrevelocidade mecânica, a Itaipu especificou e adquiriu um sistema piloto de proteção contra vazão anormal no conduto forçado. O sistema possui como premissa fundamental de segurança estar localizado fora da casa de força e atuar diretamente no fechamento de emergência da comporta de serviço em caso de fluxo anormal de água no conduto forçado.

O sistema adquirido foi instalado na U18A em novembro de 2016 durante uma parada trienal para manutenção preventiva e encontra-se atualmente em fase de avaliação. O presente trabalho apresenta os estudos realizados na fase de projeto, a instalação dos componentes e os resultados obtidos nos ensaios de comissionamento.

Palavras chave: vazão, escoamento, conduto forçado, unidade geradora, proteção.

E-mail de autor para contato: quoirin@itaipu.gov.br

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 Descrição do sistema

A especificação do sistema piloto apresentou os seguintes requisitos [1]:

- Supervisão de sobrevelocidade ou fluxo excessivo no conduto forçado de uma unidade geradora da UHI em qualquer condição operativa, baseado na técnica de medição de velocidade do escoamento no conduto forçado por ultrassom;
- Transdutores ultrassônicos do tipo intrusivo, passíveis de serem substituídos com o conduto em qualquer condição operativa e sem necessidade de inibir a supervisão de vazão;
- Instalação dos transdutores no trecho reto exposto do conduto forçado, antes da junta de dilatação do conduto; instalação livre de solda e diâmetro dos furos de no máximo 2 polegadas;
- Número de caminhos do ultrassom de no mínimo 2 e operando de forma independente, de modo que a falha de um caminho não impossibilitasse a continuidade da supervisão do fluxo;
- Painel de supervisão localizado na elevação 214 da barragem, de modo a não correr risco de inundação em caso de vazamento;
- O painel de supervisão deveria calcular a vazão esperada para a condição operativa da turbina com base nos parâmetros operacionais da unidade;
- Detecção de sobrevelocidade ou fluxo excessivo quando o fluxo medido ultrapassasse em 20 m³/s o valor esperado para a vazão, baseado na curva de colina (Figura 1b). A tolerância de 20 m³/s

corresponde ao vazamento utilizado no dimensionamento do sistema de drenagem anti-inundação da casa de força;

- Saídas de contato seco para atuação direta no fechamento de emergência da comporta da tomada d'água e para envio de comando de parada ao relé de bloqueio 86M do painel de proteção da unidade. O tempo de resposta global do sistema para envio do comando de fechamento da comporta deveria ser menor que 2 s;
- Algoritmo de segurança contra falhas de medição, processamento ou alimentação, de modo a evitar o acionamento indevido do fechamento da comporta.

Além disso, foi solicitado na especificação técnica um memorial de cálculo do perfil hidráulico do escoamento no conduto baseado na técnica de computação fluidodinâmica (CFD) e do impacto na resistência estrutural do conduto pela técnica de elementos finitos (FEM) causado pelos furos necessários para a instalação dos transdutores.

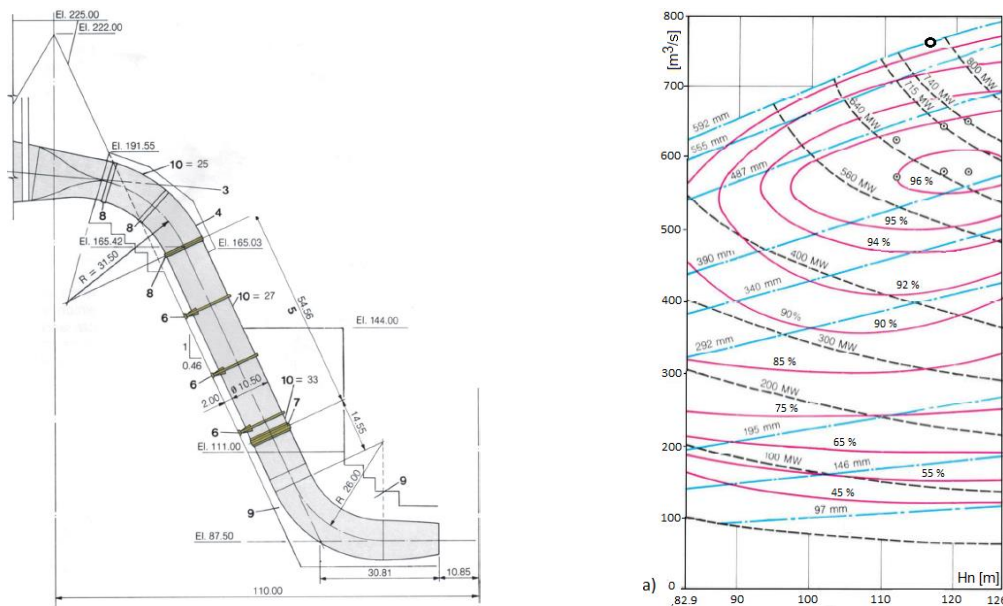


Figura 1 – a) Conduto forçado; b) Curva de colina

2.2 Conduto forçado

O conduto forçado de uma unidade geradora da UHI encontra-se esquematicamente indicado na Figura 1a, compreendendo trechos curvos e retos, embutidos e expostos. O trecho reto exposto localiza-se entre as elevações 111,0 e 165,0, sendo todo metálico neste trecho, em aço carbono SAR-50 BN, diâmetro interno nominal de 10500 mm e espessura da parede de aço variando neste trecho entre 25 mm e 40 mm.

2.3 Memorial de cálculo do perfil hidráulico do escoamento e do impacto no conduto

De forma a possibilitar a avaliação do número mínimo de caminhos de ultrassom necessários para obtenção da vazão no conduto forçado e do impacto das perfurações no conduto para instalação dos transdutores em sua resistência estrutural, foram desenvolvidas simulações fluidodinâmicas para determinação dos campos de velocidade e pressão em diversas condições operativas, para posterior avaliação dos campos de tensões mecânicas obtidos pela interação fluido-estrutura.

Estes estudos foram desenvolvidos por meio da interação fluido-estrutura de uma via, com uso do software Ansys Workbench, sendo a primeira avaliação feita na condição original do conduto e a segunda abordagem já com a tubulação perfurada. Para as simulações de CFD utilizou-se o aplicativo Fluent e para simulações estruturais o aplicativo Mechanical [2].

As configurações principais para as simulações CFD foram:

- Condição de entrada: fluxo mássico;
- Condição de saída: pressão;

- Condição de parede: não escorregamento;
- Modelo de turbulência: k-ε.

A validação dos resultados das simulações CFD foi feita com base no projeto HL-46, disponível em Bobko et al. [3]. Este projeto refere-se aos estudos em modelo físico do escoamento no conduto forçado das turbinas da UHI.

Dentre as 135 tomadas de pressão piezométricas utilizadas no modelo reduzido, 19 foram selecionadas para comparação com os resultados simulações CFD. Os resultados desta comparação para a vazão de 660 m³/s e pressão correspondente ao nível de montante de 218 mca estão apresentados no gráfico da Figura 2.

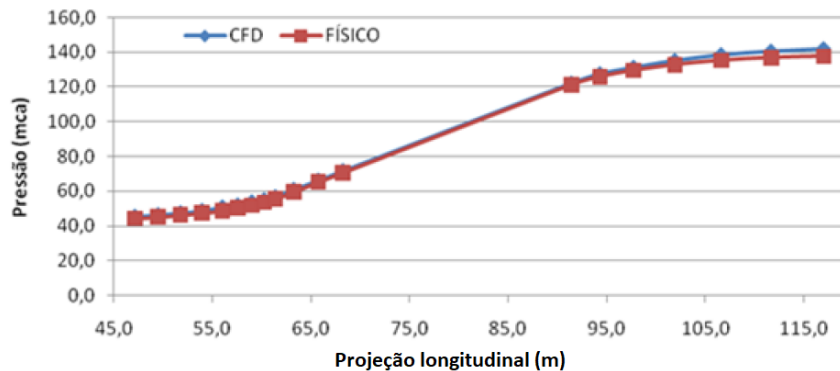


Figura 2 – Pressão do modelo físico e do CFD no trecho considerado

Com os resultados acima deu-se como validada a modelagem do escoamento do fluido e conseqüentemente o campo de pressão gerado na parede do conduto, uma vez que na região de instalação dos sensores o erro foi inferior a 1%.

2.3.1 Aplicação da interação fluido-estrutura

A interação fluido-estrutura foi analisada sob três diferentes condições para verificação da alteração do fator de segurança, considerado entre o limite de escoamento do material e as tensões de Von Mises-Hencky. As três condições consideradas foram:

- Conduto original;
- Conduto com a perfuração para instalação dos sensores ultrassônicos;
- Conduto com os sensores instalados.

Os resultados referentes aos campos de deformações devido às cargas aplicadas mostram que não houve mudança no padrão de deformação entre o conduto original e o perfurado e que a deformação máxima encontrada foi de 0,0022 m, conforme pode ser visualizado nas imagens da Figura 3.

Como esperado, as perfurações afetaram apenas localmente o fator de segurança, reduzindo-o de 5,0 para um valor mínimo de 2,1 no furo da posição 5, porém o decréscimo pontual do fator de segurança não compromete sua resistência. O valor mínimo encontrado para o fator de segurança na região dos oito furos está indicado na Tabela 1.

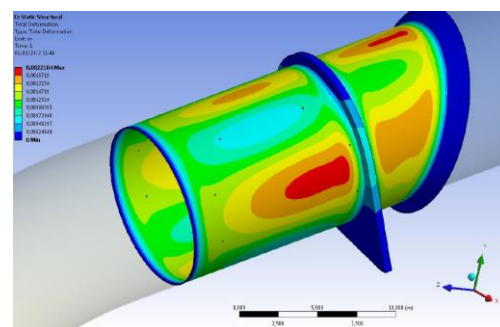
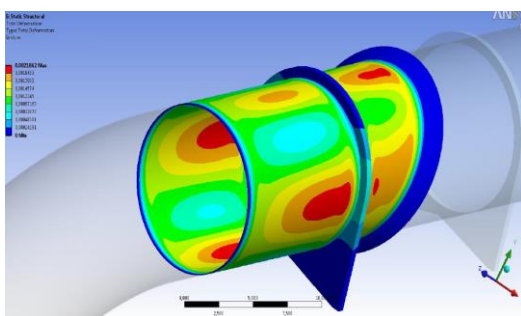


Figura 3 – Campo de deformações: a) Conduto original; b) Conduto perfurado

Tabela 1 – Fatores de segurança das perfurações

Furo	1	2	3	4	5	6	7	8
Fator de segurança	2,5	2,5	2,4	2,4	2,1	3,0	3,1	2,3

Para a verificação da condição com os sensores instalados, a fixação destes foi considerada por meio do recurso de pretensão de parafusos do Ansys Mechanical de forma a considerar uma força de 29155 N de compressão radial local sobre a parede do conduto, provocada pelo aperto de fixação dos sensores. Para tanto procedeu-se a um refinamento adicional na malha na região mais próxima dos furos. O resultado da distribuição da tensão e do fator de segurança com o sensor instalado no furo 5 pode ser visualizado na Figura 4:

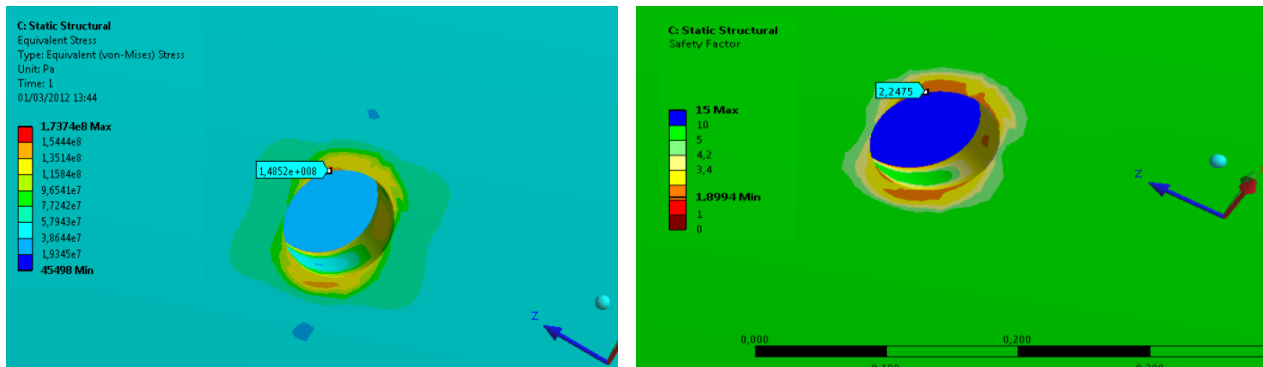


Figura 4 – Distribuição da tensão e do fator de segurança no furo 5 com o sensor instalado

O estudo relativo ao aperto para a instalação dos sensores nos furos indicou que a fixação do sensor provoca uma modificação no padrão de tensões apenas na região dos furos e que a mesma é positiva, uma vez que proporcionou um pequeno acréscimo de 0,15 no fator de segurança mínimo verificado sem o sensor, provocando um decréscimo da ordem de 49 Mpa na tensão máxima de tração verificada sem o sensor.

2.4 Princípio de medição

Os medidores ultrassônicos de tempo de trânsito dispõem de transdutores com cristais piezoelétricos que enviam e recebem pulsos acústicos de alta frequência, transversalmente à tubulação. A Figura 5 ilustra o arranjo de uma trajetória dos transdutores numa tubulação fechada para aferição de tempo de trânsito.

O pulso que segue na direção do escoamento (pulso *downstream* ou jusante) percorre a distância (L_w) entre os transdutores em intervalo de tempo (t_d) menor do que o pulso que segue na direção oposta (pulso *upstream* ou montante) percorrendo em um tempo (t_u). A diferença entre os tempos ($t_u - t_d$) de propagação será proporcional à velocidade média dos elementos presentes na trajetória, no tempo em que o pulso cruzar a tubulação.

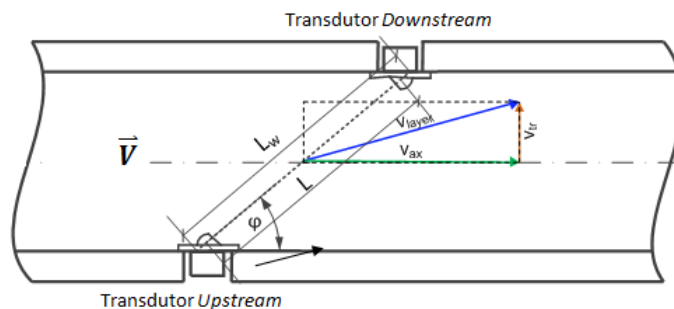


Figura 5 - Princípio do método de tempo de trânsito

A velocidade do fluido pode ser determinada em função dos tempos de trânsito:

$$c_0 = \frac{L_w}{2} \cdot \frac{t_u + t_d}{t_d \cdot t_u}$$

O medidor ultrassônico de tempo de trânsito é constituído basicamente de pares de transdutores. Cada par de transdutores forma um canal acústico. Menores incertezas de medição são obtidas com medidores com mais de um canal acústico. Neste caso, os medidores são denominados de medidores multicanais, em oposição aos medidores de uma trajetória ou canal.

Para diâmetros maiores utiliza-se múltiplas trajetórias - de 4 a 8 caminhos, conforme disposto na norma IEC 60041, ou 9 a 18 caminhos, referenciando a norma ASME PTC-18. Nestes casos, a vazão é obtida por meio de uma integração matemática, permitindo assim uma exploração ampla do perfil de velocidade do escoamento na seção transversal de análise.

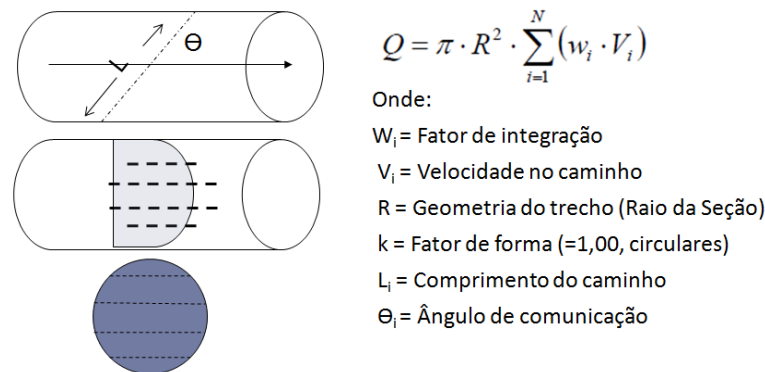


Figura 6 - Obtenção da vazão por meio de múltiplos caminhos

No caso deste sistema, as simulações CFD demonstraram que a instalação de 4 caminhos (8 transdutores) ficaria de 0,5 a 1%, atendendo a exatidão especificada.

2.5 Componentes do sistema

A Figura 7 apresenta um corte da barragem e da casa de força da usina de Itaipu com destaque para a localização dos componentes do sistema de supervisão do conduto forçado. O sistema é composto pelo painel de supervisão SCF1, responsável por receber e processar o sinal de vazão e os sinais operativos da unidade geradora, por 4 pares de transdutores ultrassônicos e pelo painel transmissor de fluxo SCF2, que realiza a medição da vazão e envia um sinal analógico para o painel SCF1.

O painel SCF1 foi instalado na elevação 214 da barragem, próximo ao painel da comporta da tomada d'água, de modo a não correr risco de inundação em caso de um vazamento grave. Já o painel SCF2 foi instalado na elevação 144, atrás do trecho exposto do conduto forçado e próximo aos transdutores ultrassônicos. O painel SCF1 recebe alimentação em 125 Vcc do sistema de corrente contínua da usina e alimenta o painel SCF2 em 24 Vcc.

2.6 Instalação

Para a instalação do sistema piloto de supervisão de vazão no conduto forçado, foi escolhida a unidade geradora U18A. Esta unidade é da segunda fase da usina de Itaipu e entrou em operação em março de 2007. A escolha desta unidade teve como motivo a existência de um painel de entradas e saídas do sistema digital de supervisão e controle na elevação 214 da barragem, próximo ao local de instalação do painel SCF1, com a vantagem de disponibilizar os sinais operativos necessários para a lógica do sistema. Além disso, levou-se em consideração que a unidade estaria parada por um período de 45 dias para trabalhos no regulador de velocidade [4].

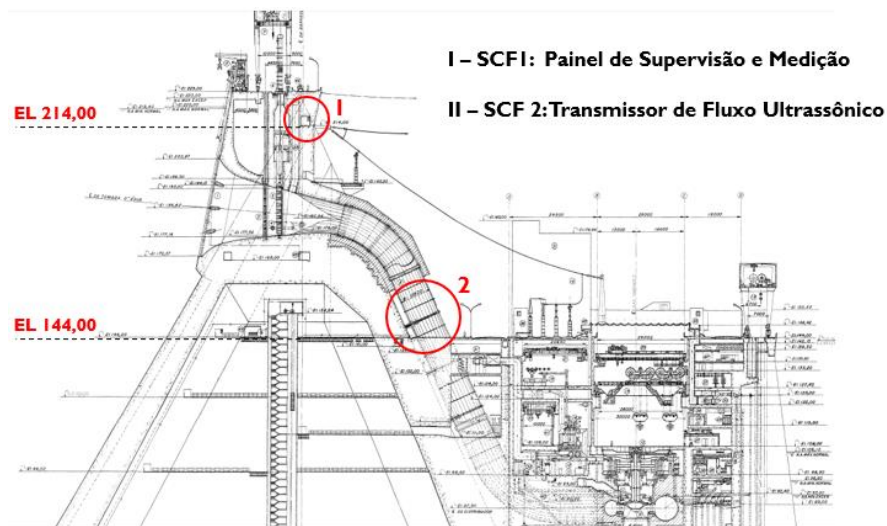


Figura 7 - Localização dos painéis do sistema

A instalação do sistema consistiu nas seguintes etapas:

- Perfuração do conduto forçado;
- Instalação dos transdutores e respectivas válvulas;
- Lançamento de cabos e instalação de eletrodutos;
- Instalação dos painéis;
- Comissionamento do sistema.

A perfuração do conduto forçado foi feita com uma furadeira de base magnética com encaixe para fresa anular. Foram feitos 8 furos com diâmetro de 2". Em cada furo foi instalada uma válvula de fixação do transdutor, com pino e trava de segurança.

A Figura 8 mostra uma vista lateral do conduto forçado apresentando 4 dos 8 transdutores acústicos.



Figura 8 - Vista do conduto forçado com os transdutores acústicos

2.7 Descrição da lógica de alarmes

Para a avaliação das assinaturas operacionais da turbina da U18A, o painel SCF1 recebe as seguintes informações:

- Níveis de água montante (NM) e jusante (NJ); pressão de entrada da turbina (P_1); potência ativa do gerador (P_{eel}); abertura do distribuidor (DIST) e rotação do conjunto (ROT);
- Vazão turbinada (Q): obtida do painel de medição ultrassônico (SCF2).

Os sinais NM, NJ, P_1 , P_{eel} e Q são utilizados diretamente para o cálculo das potências e rendimentos com base teórica nas normas IEC 60041 e ASME PTC-18 [5]. Já os sinais de DIST e ROT são necessários para validar a condição funcional da máquina – parada, giro mecânico sem carga e com carga.

Cada sinal obtido passa por um processo de aceitação individual, antes de ser inserido nos cálculos de rendimentos do processo. Este tratamento impede que valores espúrios sejam utilizados de forma inadequada nos cálculos e criar falsos resultados. As curvas operacionais da turbina foram obtidas da curva de colina da mesma, e verificadas durante ensaios de comissionamento de campo do sistema de supervisão. Considerando os sinais de entrada do sistema, e as assinaturas (ou curvas) operacionais cadastradas, pode-se descrever o funcionamento do sistema como descrito a seguir:

- Identificação da condição funcional da máquina;
- Aceitação individual dos sinais de entrada;
- Cálculos das potências e rendimentos do processo;
- Comparação dos resultados com as assinaturas operacionais;
- Validação, por comparação, da vazão turbinada esperada *versus* medida;
- Indicação de alarme, caso a validação da vazão não seja feita.

O sistema é capaz de, para qualquer condição funcional da máquina, verificar se a vazão medida condiz com a vazão esperada, via as assinaturas operacionais. São consideradas, devido aos instrumentos, mecanismos e cálculos do processo, todas as incertezas sistemáticas e randômicas.

3. RESULTADOS

Os ensaios operacionais de comissionamento foram estabelecidos visando conhecer e ajustar a divergência dos valores medidos da vazão com relação à referência, verificar o ajuste estabelecido para alarme de vazão anormal e o correto funcionamento da lógica estabelecida para a condição de rejeição de carga.

A verificação da divergência dos valores medidos foi realizada por meio da determinação do desvio com relação aos valores de vazão previstos pela curva de colina de projeto na queda líquida do ensaio realizado. As curvas de referências foram obtidas da modelagem 3D da curva de colina de projeto para nove quedas líquidas.

Devido à dificuldade operacional de realizar um ensaio com variação de carga em todas as curvas de referência implementadas, optou-se pela verificação da divergência das medições em apenas uma queda de referência.

De forma a se poder fazer a comparação com a curva operacional de referência com queda líquida mais próxima das quedas do ensaio, os valores medidos de vazão foram transpostos para a queda líquida de 115,0 m, seguindo os critérios da norma IEC 60041, exceto para os patamares de 0 MW e 35 MW, para os quais adotaram-se valores de vazão que possibilitassem a suavidade da curva de eficiência nesta região.

A comparação dos valores medidos de rendimento, incluindo os limites de incerteza da medição, e os valores previstos pode ser visualizada nas curvas de rendimento apresentadas na Figura 9:

Com a curva operacional implementada no sistema, deu-se início ao ensaio de simulação de vazamento por meio de abertura da válvula 18DC, usada para a drenagem da caixa espiral. Entretanto, em função da dificuldade encontrada nesta manobra a mesma foi cancelada. É importante lembrar que esta válvula é normalmente manobrada com a unidade parada e conduto vazio e não com conduto pressurizado e a unidade geradora em operação.

Como alternativa para a verificação da capacidade de detecção de vazão anormal, mediu-se o sinal de corrente enviado pelo painel SCF2 ao SCF1 e, com a ajuda de um gerador de sinais, foi injetada uma corrente com um incremento correspondente a uma vazão incremental de 20 m³/s. Ao aplicar esta corrente, a vazão inicial de 699 m³/s passou para 716 m³/s e constatou-se a atuação correta dos alarmes de nível alto e nível muito alto de sobrevelocidade.

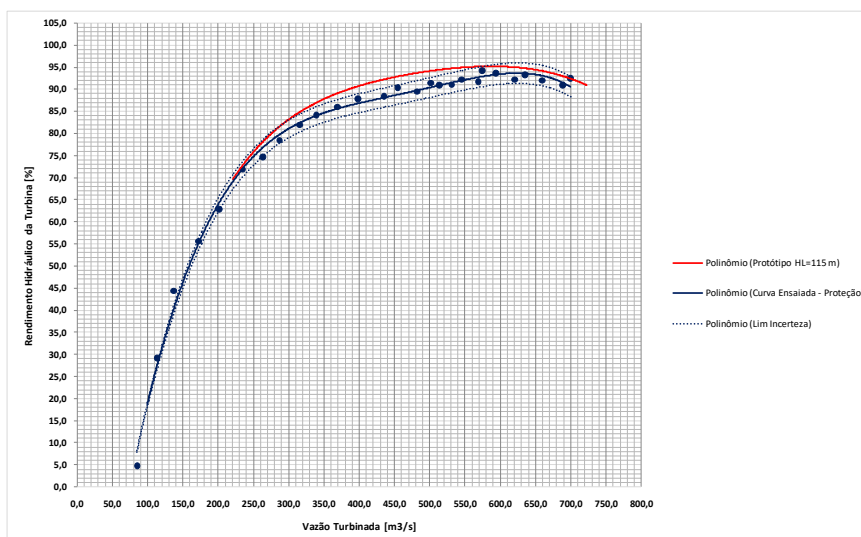


Figura 9 – Curva operacional medida e de projeto

Por último, realizou-se um ensaio de rejeição de carga, verificando-se que nesta situação o sistema não gera alarmes indevidos.

4. CONCLUSÃO

Os resultados dos ensaios de comissionamento e a fase de avaliação do sistema mostraram que a técnica de medição de vazão no conduto forçado por ultrassom tem ótima aplicação e apresenta medições muito próximas aos valores previstos pelas curvas do protótipo da turbina.

A experiência com este sistema mostrou que a instalação dos transdutores acústicos pode ser feita com segurança, sem comprometer a resistência estrutural do conduto forçado, como já havia demonstrado a simulação por elementos finitos.

O sistema piloto encontra-se atualmente no final de sua fase de avaliação. Em razão da ocorrência de alguns alarmes indevidos, está prevista a realização de novos ensaios de variação de carga na unidade geradora U18A com o objetivo de aplicar ajustes à lógica de detecção de vazão anormal.

Em vista dos bons resultados alcançados e do bom desempenho do sistema piloto, foi incluído na especificação técnica da atualização tecnológica de Itaipu um sistema de medição de vazão no conduto forçado para todas as unidades geradoras da usina. Cada sistema deverá contar com transdutores dedicados para o envio dos sinais operativos da respectiva unidade geradora.

5. REFERENCIAS

- [1] Especificação Técnica 057/2013 - Sistema de detecção e proteção contra sobrevelocidade no escoamento de água no conduto forçado. Código 5133-20-19000-P.
- [2] ANSYS Inc. Ansys Workbench. Canonsburg: Ansys Inc.
- [3] Bobko, G. & Neidert, S. H. 1977. Projeto HL-46 – Estudos em modelo reduzido do aproveitamento hidrelétrico do rio Paraná em Itaipu. Curitiba: CEHPAR, 1977. Relatório técnico, Centro de Hidráulica Parigot de Souza.
- [4] Sistema de detecção e proteção contra sobrevelocidade no escoamento de água - UHE Itaipu. Relatório de instalação e comissionamento. Código 5215-50-G7841-P.
- [5] IEC 60041:1991. Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines.