



**XXIII SNPTEE
SEMÍNÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GGH/02
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - I

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

**OTIMIZAÇÃO DA FAIXA OPERATIVA DAS TURBINAS HIDRÁULICAS DA UHE SALTO PILÃO
COM GANHOS OPERATIVOS DIRETOS E INDIRETOS**

**Fernando Pedrassani Costa Neves (*)
Nytech**

**Clóvis Ollé Fischer Santos
Opersul**

RESUMO

A UHE Salto Pilão opera com unidades geradoras de 95,94 MW e dispõe de um reservatório insignificante, utilizado apenas para a adequada captação e assim caracteriza-se como uma usina a fio d'água. A operação em baixas cargas fica restringida pela faixa operativa das turbinas, a qual proíbe ou limita o número de horas de operação em certas condições de vazão x níveis minimizando danos causados por cavitação e/ou instabilidades hidráulicas.

Esse trabalho mostra as avaliações que levaram a redefinição da faixa operativa das turbinas e a adoção de novos procedimentos de operação o que praticamente eliminou a necessidade de parar as unidades por baixa vazão afluente.

PALAVRAS-CHAVE

Otimização, Faixa Operativa, Vibração, Cavitação, Análise Acústica

1.0 - INTRODUÇÃO

Em usinas a fio d'água, onde o volume acumulado na barragem é insuficiente para proporcionar uma regularização das vazões turbinadas, o despacho de potência das unidades geradoras, praticamente, segue a afluência instantânea. Entretanto, para vazões menores o despacho fica limitado pela faixa operativa das turbinas, a qual proíbe ou limita o número de horas de operação em certas condições de vazão x níveis para limitar os danos causados por cavitação e/ou instabilidades hidráulicas.

Desta forma, em função da falta de capacidade de regularização das vazões, as limitações impostas pela faixa operativa impedem o aproveitamento integral de toda a série de afluências e as turbinas acabam sendo desligadas na condição de vazões afluentes menores que as permitidas em sua faixa operativa. Nesta condição de pouca vazão, com as unidades geradoras paradas e sem capacidade de armazenamento no reservatório, a energia correspondente às pequenas afluências, acaba sendo perdida, paradoxalmente, por vertimento.

Este é o caso da UHE Salto Pilão (UHSP), Localizada no Rio Itajaí-Açu em Santa Catarina, a qual possui duas unidades geradoras de 95,94 MW, com turbinas tipo Francis, que iniciou sua operação comercial em dezembro de 2009. Possui reservatório com pequeno volume de armazenagem formado pela barragem de desvio de 3m de altura, caracterizando-se, assim como uma usina a fio d'água.

Do início da operação comercial (dez 2009) até Novembro de 2012 foram realizadas um total de 39.252 horas em serviço (21.338 na UG1 e de 17.914 na UG2). Neste período, as unidades operaram apenas 725 horas na faixa mínima (25% de carga) correspondendo a 2% do tempo. Entretanto, durante o ano de 2012 ocorreu uma condição de maior permanência em baixas afluências, a qual é prevista na série histórica de vazões, com longos períodos de

(*) Rua Professor Antônio Pereira Gutierrez, 49 – CEP 88035-070 Florianópolis, SC – Brasil
Tel: (+55 48) 8865-4884 – Email: nytech.engenharia@gmail.com

vazões menores que aquela necessária para manter a geração mínima determinada pelo fabricante (23MW), impondo cerca de 20 dias sem geração, com as duas unidades disponíveis, porém paradas e ao mesmo tempo com vertimento de vazões inferiores ao necessário para a geração com 25%. Ressalta-se que além da interrupção da geração, a alimentação dos serviços auxiliares tem que ser suprida com energia auxiliar externa em 23 kV da concessionária CELESC, elevando o custo operacional.

Para minimizar este impacto, foram estudadas alternativas que permitissem a continuidade da geração e da minimização dos custos decorrentes. A possibilidade de redefinição da faixa operativa, liberou a operação com valores mais baixos de potência o que praticamente eliminou a necessidade de parar as unidades por baixa vazão afluente.

Esse trabalho aborda conceitos dos danos causados pela cavitação que as turbinas hidráulicas estão sujeitas por operarem fora de seus valores ótimos de vazão turbinada, os mecanismos de avaliação on-line que foram utilizados para levantar o comportamento das turbinas nas diversas faixas de potência, a análise desses dados, a definição da nova faixa operativa, e as condições em que as unidades operaram após a liberação para operação com essa nova faixa. Finalmente analisa os resultados com base no ganho proporcionado para a operação e na avaliação do estado da turbina com os resultados dos ensaios realizados na inspeção quadrienal programada.

2.0 - LIMITAÇÕES DE FAIXA OPERATIVA E CAVITAÇÃO

Os perfis hidráulicos das turbinas Francis normalmente são projetados para otimizar a operação em faixas de potências mais elevadas, ou de maior permanência, ajustando os pontos de maior eficiência para estas condições, e assim maximizar a produção global de energia.

Na operação fora da faixa otimizada pelo projeto da turbina podem aparecer problemas de cavitação e/ou instabilidades hidráulicas. Esse é o caso da operação em baixas cargas. Com aberturas pequenas de distribuidor e fluxos muito diferentes daqueles do ponto ótimo, fica difícil manter a correta distribuição de velocidades/pressões da água e garantir que a energia da água possa ser transferida integralmente ao rotor ao longo das pás da turbina.

Assim, ao operar fora da condição otimizada da turbina, podem ocorrer zonas de alta velocidade, onde a água descola da pá, sem empurrá-la (sem transferir energia) criando pontos de baixa pressão, nos quais pode-se atingir pressões abaixo da pressão de vapor, provocando a vaporização instantânea das partículas de água, com absorção de energia. As partículas vaporizadas ao atingirem as zonas de maior pressão implodem, devolvendo a energia absorvida, num processo cíclico conhecido por cavitação.

2.1 O Processo de Cavitação

No processo cíclico de cavitação, devido às ondas formadas pela alternância de pressões, positiva e negativa, que se criam na água, formam-se bolhas de vapor micrométricas. As bolhas, submetidas a essas ondas de pressão alternada crescem até atingir um tamanho determinado pelas condições de produção/ressonância, e aí implodem. Pouco antes da implosão das bolhas há uma enorme quantidade de energia armazenada no interior da própria bolha, que ao ser liberada, realimenta a geração das ondas nas frequências determinadas pelos ciclos de excitação/explosão/crescimento/implosão.

A energia envolvida nesse processo cíclico (baixa pressão/vaporização alta pressão/implosão das partículas de água) que caracteriza a cavitação é alta (540 calorias por grama de água evaporada) produzindo vibrações/ondas mecânicas/ondas sonoras com frequências que vão da faixa audível até a faixa de ultrassom, capazes de causar desgastes acentuados na turbina dependendo da severidade/quantidade de cavitação. O acúmulo de energia em função do processo cíclico é tal que são produzidas temperaturas extremamente elevadas no interior da bolha de cavitação, que provocam aumento de pressão no vapor em seu interior, podendo atingir até 500 Atm. Quando a implosão da bolha ocorre próxima à superfície dura do metal, a bolha reduz-se a um décimo de seu tamanho original, transformando-se em um jato que se desloca a velocidades de até 400 km/h em direção à superfície dura. Com a combinação de pressão, temperatura, e velocidade, o jato arranca partículas da superfície das suas ligações com o substrato, provocando erosão na turbina.

Os efeitos de erosão/arrancamento dependem da energia e da frequência das ondas produzidas pela cavitação e instabilidades hidráulicas. Ondas de ultrassom de frequências mais altas, de 30kHz para cima criam bolhas menores e, conseqüentemente, com menor concentração de energia. As frequências próximas da faixa audível (de 15kHz a 25kHz) criam bolhas maiores, com maior potencial de dano à turbina. Desta forma, uma avaliação da quantidade e severidade da cavitação que está ocorrendo na turbina pode ser feita através da medição de intensidade e frequência das ondas sonoras produzidas no processo de cavitação.

2.2 Restrição de Faixa Operativa

Em função das incertezas do comportamento de cavitação, que pode ocorrer em vários pontos fora da faixa otimizada de projeto, os fabricantes definem os limites máximos e mínimos da faixa operativa.

No caso da UHSP a região de eficiência máxima fica entre 75% e 95% da potência nominal, sendo o desenho das pás da turbina otimizado para aproveitar a máxima energia das vazões nesta faixa, conforme mostrado na Figura 1.

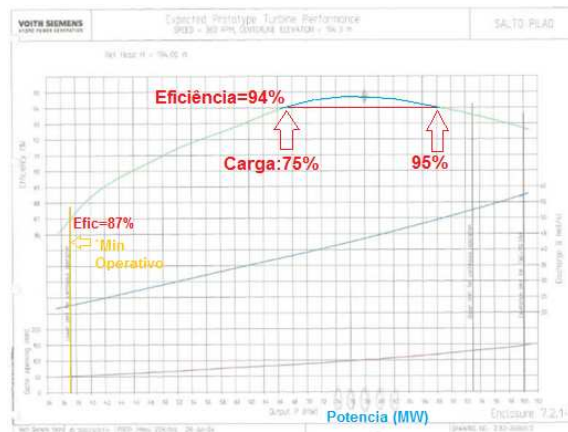


Figura 1 - Desempenho esperado para as turbinas da UHE Salto Pilão

O limite operativo, normalmente, é identificado pelos fabricantes de turbinas, a partir de modelos matemáticos e de testes em laboratório através de modelos reduzidos, observando e quantificando efeitos da cavitação e vibrações no sentido de identificar as zonas onde estes efeitos se pronunciam e, conseqüentemente, aumentam a probabilidade de estresse e desgaste acelerado da turbina. Assim, para o estabelecimento da faixa operativa contratual, o fabricante adotará uma zona de operação permitida na qual pode garantir o atendimento aos limites contratuais de desgaste produzidos por cavitação e/ou instabilidades hidráulicas, que para cavitação abrangem os seguintes aspectos:

- A profundidade máxima dos arrancamentos.
- Percentual da área superficial total de cada pá do rotor, que poderá ser afetada por cavitação (considerando-se ambos os lados erosão por cavitação).
- Perda total de material.

2.3 Faixa Operativa da UHE Salto Pilão

A faixa operativa prevista no projeto (*operating range*) é definida na curva de colina (vazão x queda). No caso da UHSP a potência mínima da faixa operativa é de 37 MW para operação contínua sem restrições (40% da potência nominal), correspondendo a vazões de cerca de 22 m³/s. Em adição à esta curva de operação contínua, o fabricante manteve a garantia de danos de cavitação para a operação em potências de até 25% da nominal por um período de 500 horas ano, resultando em uma curva estendida.

O valor contratual de 500 horas por ano para operação em potência abaixo 37MW visa limitar a extensão dos desgastes produzidos pela cavitação, presente nesta faixa de potência, para que os mesmos (desgastes) fiquem dentro do range de valores garantidos e aceitáveis pelo equipamento. Para a UHSP, não existem outras limitações contratuais de faixa operativa, impostas por instabilidade hidráulica ou vibrações.

3.0 - RESTRIÇÃO DE OPERAÇÃO DA UHSP EM BAIXAS VAZÕES

Na ocorrência de vazões afluentes menores que aquela necessária para manter de forma contínua a vazão sanitária e uma unidade com potência mínima de 23 MW, a unidade é mantida na potência mínima de 23MW até que se esgote o volume armazenado no reservatório (entre as cotas 319 e 318 m). Assim, mantendo-se a mínima vazão operativa, opera-se até que seja atingido o nível mínimo operacional do reservatório, na cota 318 m e, na impossibilidade de manter-se este nível, a unidade tem que ser desligada. Nesta condição, além da interrupção da geração na UHSP, a alimentação dos serviços auxiliares tem que ser suprida com energia auxiliar externa em 23 kV.

Devido ao pequeno volume do reservatório da UHSP, mesmo com a baixa afluência, em pouco tempo após a interrupção de geração ocorre vertimento. Entretanto, caso seja recolocada a unidade em operação, o volume acumulado no reservatório isoladamente, sem afluência, não é suficiente para manter a unidade por mais de duas horas operando no valor mínimo (25%). Como as unidades geradoras da UHSP não são concebidas para operação intermitente, nem estão adaptadas para operar como compensador síncrono, a mesma só retorna à operação quando a vazão afluente for suficiente para garantir uma operação contínua, perdendo-se a energia equivalente aos volumes vertidos.

4.0 - ESTUDOS PARA VERIFICAÇÃO DE POSSIBILIDADE DE OPERAÇÃO EM POTÊNCIAS ABAIXO DE 25% DA NOMINAL

No sentido de identificar alternativas e evitar a perda de geração, minimizando, assim, a interrupção da operação durante períodos de baixa fluência, foram realizados estudos com análise e avaliação das restrições, das condições de operação e comportamento da turbina operando em potências inferiores a 25% da potência nominal. Os pontos considerados foram:

- Restrição de operação em baixas vazões - Limitação de campo operativo.
- Valores limites e garantidos de cavitação.
- Avaliação de vibração em faixas fora do campo operativo.
- Avaliação acústica (quantificação de intensidade de cavitação).
- Avaliação dos desgastes e margens atuais de cavitação após 20.000 horas de operação e 500 horas operando em faixa crítica.
- Operação cíclica em cargas abaixo de 23 MW.
- Ganho de energia assegurada.

Observa-se que mesmo na faixa operativa garantida contratualmente (operating range), existem pontos de maior intensidade de vibração e cavitação que deveriam ser evitados para maximizar a vida útil da turbina. De maneira análoga, podem existir pontos fora da faixa operativa contratual onde as condições de vibração/instabilidades hidráulicas e cavitação fiquem dentro de parâmetros aceitáveis, que não afetem a vida útil da turbina, ou seus componentes.

Desta forma, uma perfeita identificação das reais condições de cavitação e instabilidades, através do comportamento verificado no campo, é fundamental para estabelecimento da real faixa operativa de forma a orientar que a operação se faça realmente em pontos de menor desgaste e, ao mesmo tempo, identificar faixas possíveis de operação que permitam estender a faixa operativa do projeto.

Para a identificação das faixas críticas de ocorrência de cavitação e instabilidades hidráulicas e permitir modular a operação em faixas de menor dano ao equipamento (vibração e cavitação) foi adotado um acompanhamento combinando a utilização do sistema de monitoramento "on line" das unidades geradoras com a análise de sinais acústicos no cone de sucção.

Com base nos dados de vibração e da análise de sinais acústicos foi realizada a comparação dos resultados obtidos na operação real nas diversas potências com a faixa operativa definida originalmente pelo fabricante. Tomando como base as inspeções realizadas após operação na faixa operativa original foi possível inferir que outras faixas operativas, com o mesmo comportamento de vibração e acústica, levariam ao mesmo efeito nas turbinas.

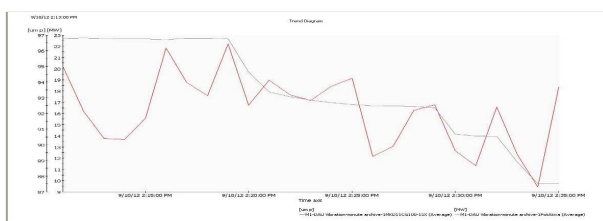
Dessa forma foi possível ajustar o despacho ótimo das unidades geradoras definindo-se novos pontos de operação que permitiriam a maximização da energia produzida e identificados pontos dentro da faixa operativa cuja operação seria menos recomendável de forma minimizar o impacto na indisponibilidade e custos de manutenção.

5.0 - ESTUDO DE VIBRAÇÕES EM MANCAIS E NO CONE DE SUÇÃO

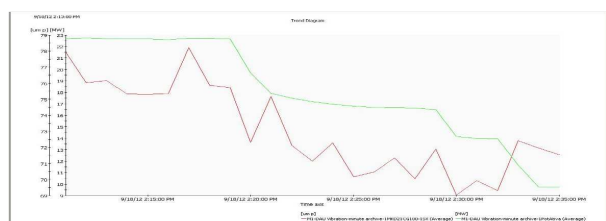
Em 18/09/2012, aproveitando a condição de iminente parada da UG1 por falta de fluência, foram realizados ensaios, operando por curto intervalo de tempo em cargas menores que 23 MW. Nestes ensaios foram realizadas medições de vibrações em todos os mancais e no cone de sucção, com avaliação de cavitação pela presença de ruído específico. As medições e avaliações foram realizadas em 4 patamares de carga: 23 MW, 18 MW, 14 MW e 10 MW, com nível de montante na cota 318,16 m e de jusante na 112,28 m.

5.1 Medições de vibrações de mancais

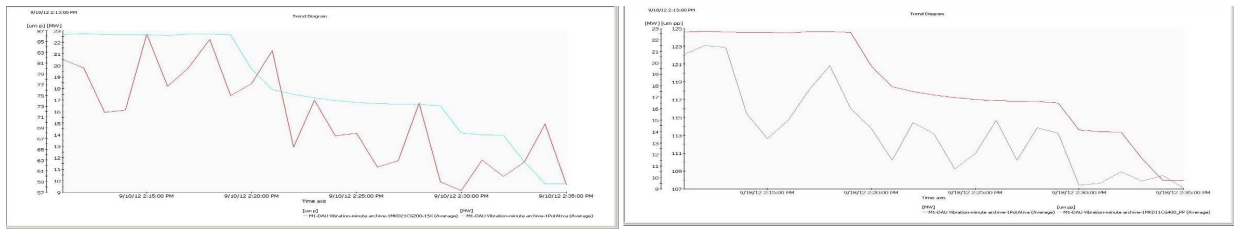
As vibrações foram analisadas através do Sistema de Monitoramento "on line" HyCon 400 nos quatro patamares de potência, respectivamente, 23 MW, 18 MW, 14 MW e 10 MW, conforme mostrado na Figura 2 (vibrações relativas - Smax) e na Figura 3 (vibrações absolutas).



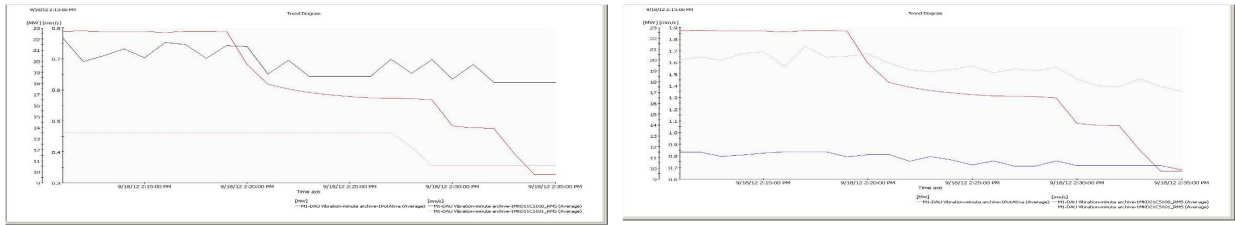
Mancal Guia Superior –MGS - radial



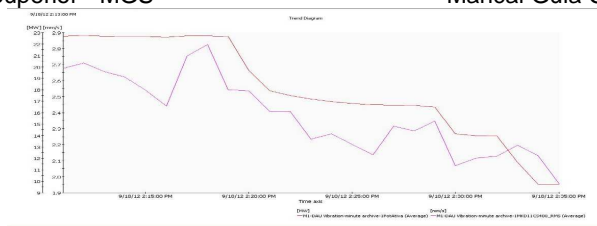
Mancal Guia Combinado –MCG - radial



Mancal Guia da Turbina– MGT - radial Mancal Guia Combinado – MCG - axial
 Figura 2 - Vibrações relativas– Smax nos mancais



Mancal Guia Superior - MGS Mancal Guia Combinado - MCG



Mancal Guia da Turbina - MGT
 Figura 3 - Vibrações absolutas nos mancais

A permanência de amplitude de vibração nas potências de 10 MW, 14 MW, 18 MW e 23MW é mostrada na Figura 4.

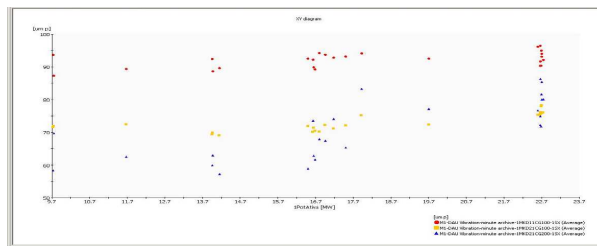


Figura 4 - Vibrações relativas (Smax) x potência

5.2 Vibração no cone de sucção e avaliação de ruído de cavitação

Nos mesmos patamares de potência, foram realizadas as medições de vibração no cone de sucção, obtendo-se os valores apresentados na Tabela 1.

Tabela 1– Vibrações no cone de sucção

Potência (MW)	Vibração relativa (µm pp)	Vibração absoluta (mm/s)
23	130	16
18	150	22
14	200	24
10	100	14

5.3 Análise do resultado das medições de vibração e avaliação de cavitação

A análise das medições de vibração de mancais mostra que as amplitudes diminuem para as potências abaixo de 23 MW, sendo que em 10 MW as amplitudes são as menores. Desta forma, a vibração em mancais não se consiste em elemento impeditivo para operação em cargas menores que 23 MW. Entretanto, quando se analisam as vibrações no cone de sucção os resultados são diferentes: verifica-se que com 14 MW e 18 MW existe aumento expressivo de vibração no cone de sucção, conforme pode ser observado na Figura 5.

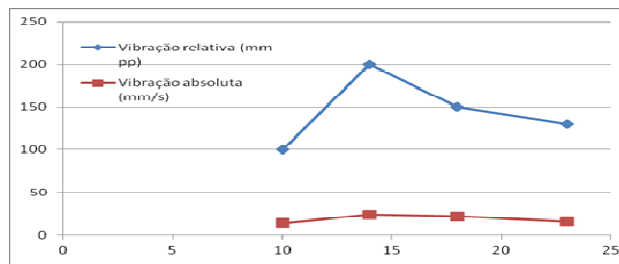


Figura 5 - Vibrações no cone de sucção

Seguindo o comportamento medido na vibração no cone de sucção, o nível de cavitação, inferido pelo aumento do ruído característico, também aumenta expressivamente, atingindo um máximo em 14 MW. Já para potência de 10 MW, os níveis de cavitação (inferidos através do ruído) e vibração no cone de sucção são inferiores aos verificados em 23 MW. Assim a potência de 10 MW, a priori, mostra-se melhor em níveis de vibração de mancais, de cone de sucção e de ruído que a potência de 23 MW.

6.0 - MEDIÇÕES ACÚSTICAS

Ressaltasse que os danos causados por cavitação são proporcionais à intensidade sonora do ruído por ela gerado, sendo estes danos também dependentes de sua composição harmônica. Nos ensaios realizados nas medições de vibração e avaliações acima descritas, verificou-se um menor nível de ruído em 10 MW do que em 23 MW. Para confirmar esta percepção e estudar a composição espectral do ruído foram realizadas medições e avaliações acústicas, comparando-se a intensidade e distribuição espectral para as potências de 10 MW, 23 MW e 37 MW.

Na Figura 6 são apresentados os gráficos de distribuição harmônica, de 60Hz a 16kHz, dos ruídos medidos no cone de sucção. A coluna da direita de cada gráfico apresenta a intensidade total do ruído medido (escala de amplitudes em dB).

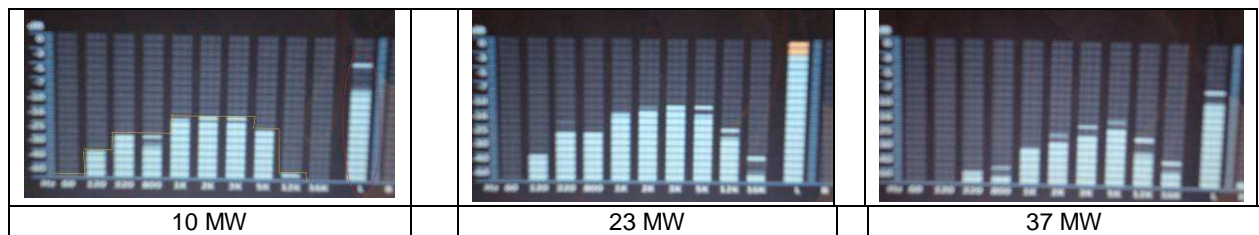


Figura 6 - Composição harmônica dos ruídos medidos no cone de sucção

Como pode ser visto na Figura 7, a intensidade total em 10 MW é muito menor que em 23 MW, sendo da mesma ordem de grandeza daquela encontrada em 37 MW. Adicionalmente, na potência de 10 MW temos menores amplitudes nas frequências potencialmente mais agressivas (mais altas – 12 kHz e 16 kHz).

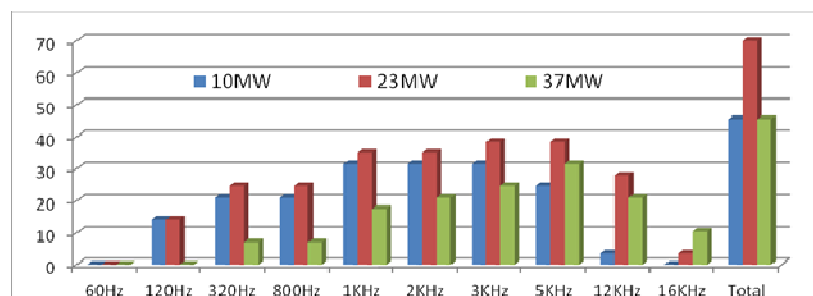


Figura 7 - Comparativo da composição harmônica do ruído no cone de sucção

Desta forma, pela análise das componentes harmônicas na potência de 10 MW infere-se que os danos por cavitação serão menores que em 23 MW, o que permitirá operar por um tempo maior em 10 MW mantendo-se o mesmo critério de desgaste máximo por cavitação.

7.0 - AVALIAÇÃO DO ESTADO DO ROTOR APÓS 21.000 HORAS DE OPERAÇÃO NA FAIXA DE ATÉ 23 MW

Para definição de referência dos danos produzidos pela operação na faixa limite originalmente garantida pelo contrato (500 horas a 25%) foram feitas medições e registros após operação de 500 horas na faixa limite. Os danos encontrados nesta na avaliação de cavitação (novembro/2012), após um período total de operação da UG1 de 21.000 horas, das quais 525 horas na faixa crítica foram muito inferiores ao limite de garantia contratual para

um período de 8.000hs. Este resultado indicou que o número de 500 horas permitido para operação na faixa crítica era ainda conservador.

8.0 - OPERAÇÃO CÍCLICA EM BAIXAS VAZÕES COM 10 MW E 23 MW

Em condições como de afluência pouco abaixo da mínima requerida para operação contínua a 25%, mas com previsão de precipitação, seria interessante poder operar a unidade gerando numa potência menor (abaixo de 23 MW), evitando que o reservatório caia até o mínimo operacional (cota 318 m), onde é requerida a parada das unidades geradoras. Esta operação em carga reduzida seria feita por período suficiente para recuperar o nível do reservatório até a cota 319 m (nível onde começa o vertimento) quando se retornaria à geração de 23 MW e assim repetindo-se os ciclos de carga reduzida (< 23 MW) e 23 MW, observando o limite de 500 horas por ano na operação em potências abaixo de 37 MW.

Mesmo que ocorram faixas proibidas entre 10% e 25%, a existência de um ponto abaixo de 23 MW, permite através da operação cíclica aproveitar todas as vazões afluentes entre 10 MW e 23 MW. No gráfico da Figura 8 **Erro! Fonte de referência não encontrada...**, considerando-se uma vazão afluente de $20 \text{ m}^3/\text{s}$, é mostrada a comparação do nível do reservatório em dois casos: na operação original com limite de 23 MW e na operação em ciclos de carga 23 MW e 10 MW. Na operação original, em vermelho), para vazões afluentes menores que 23 MW, mantém-se a unidade operando com potência de 23 MW. até que o nível do reservatório atinja a cota 318 m quando a unidade tem que ser desligada. Após 3,5 horas de unidade parada inicia-se o vertimento (cota 319m).

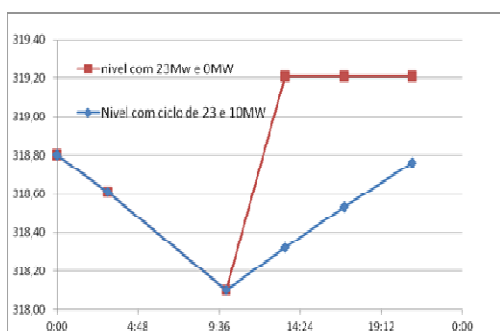


Figura 8 - Comparação Operação cíclica em baixas vazões e operação original

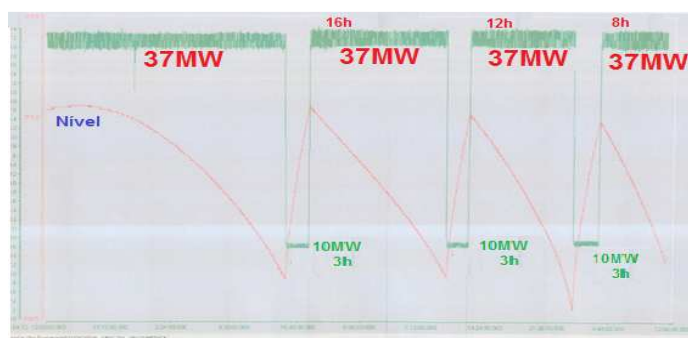


Figura 9 - Operação cíclica em 37 MW e 10 MW em baixas vazões

Já para operação cíclica (curva azul) quando atingida a cota de 318 m a carga é reduzida para 10 MW, fazendo com que o nível do reservatório volte a subir, porém mais lentamente. Quando próximo da cota 319 m, aumenta-se a carga, evitando-se assim o vertimento e a perda de energia correspondente ao volume vertido. Uma vez que em 37 MW existe potencial de cavitação menor que em 23 MW adotou-se a operação em ciclos de 10-37MW. Na Figura 9 apresenta-se registro dessa operação. À medida que a vazão vai diminuindo ajustam-se os tempos do ciclo, aumentando-se a relação dos períodos de operação na faixa crítica/faixa sem restrições

9.0 - GANHO DE ENERGIA

Pela análise da série histórica de vazões, verifica-se que existe uma expectativa de ocorrência de vazões abaixo daquela requerida para a potência mínima estabelecida contratualmente (23 MW), de 7,5% do tempo, correspondendo a cerca de 27 dias de unidade parada por ano. No caso do estabelecimento do limite de faixa operativa (geração mínima) em 10 MW, o número de dias de unidade parada por ano reduz-se para 13, com um ganho médio anual de 14 dias de geração, e um ganho de energia assegurada superior a 0,6 MWh médio (a ser calculado de acordo com os modelos). Essa análise é apresentada na Tabela 2, onde são apresentados o número de dias de ocorrência de vazões menores que a necessária para a geração mínima permitida de 23 MW e o ganho obtido ao considerarmos potências mínimas menores que a atual.

Tabela 2– Análise do ganho de energia e receita

Análise de ocorrência de vazões de jan/1941 a out/2012	<24m ³ /s	<20m ³ /s	<17m ³ /s	TOTAL
Potência mínima permitida (MW)	23MW	15MW	10MW	
Total de dias no período				26.245
Dias com vazões menores	1.973	1.281	911	
% do tempo parada	7,5%	4,9%	3,5%	
Dias por ano parada	27,4	17,8	12,7	
Dias adicionais de geração		9,6	5,1	14,7
MWh adicionais		3.926,56	1.481,97	5.408,54

Receita adicional estimada (R\$/ano) a 150R\$/MW				811.280,47
--	--	--	--	------------

10.0 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Pelas medições realizadas na UHE Salto Pilão verificou-se que as vibrações nos mancais diminuem proporcionalmente à redução de potência para as potências menores que 23 MW, não se constituindo, assim, em fator limitante para operação em qualquer das cargas avaliadas.

Com relação à cavitação, verifica-se aumento expressivo de ruído de cavitação e vibração no cone de sucção com 18 MW e 14MW, recomendando evitar a operação nesta faixa.

Já para potência de 10 MW, os níveis de cavitação, inferidos através da vibração no cone de sucção e análise acústica do ruído da cavitação, são inferiores aos verificados em 23 MW. Os valores menores de vibração no cone e o menor ruído de cavitação permitem induzir um desgaste menor por cavitação, compatível com aquele encontrado em 37 MW, o que liberaria a operação com 10 MW por períodos maiores que aqueles de 500 horas por ano definidas para 23 MW.

Pelos estudos realizados, a faixa operativa pode ser estendida para incluir o ponto de 10 MW, entretanto, devendo ser evitada a operação na faixa intermediária, entre 10 MW e 23 MW. Inspeções anuais realizadas após a adoção dessa sistemática comprovaram a não existência de danos por cavitação.

Considerando-se a operação cíclica proposta, usando-se o volume acumulado do reservatório, pode-se operar em toda a faixa de vazões correspondentes a potências de 10 MW a 23 MW, o que na prática permitirá o uso de todas as vazões acima de 10 MW, liberando uma faixa operativa de 10 MW a 100% da potencia nominal.

11.0 - RESULTADO

Como resultado obteve-se ganho de produção de energia, expressivo ganho de flexibilidade operacional, redução no número de paradas e nos desgastes associados (ciclos térmicos, desgastes por frenagem, etc.), e diminuição do consumo de energia da fonte externa com redução de custo operacional.

Após a realização de estudos e medições, foram definidos novos procedimentos operacionais que permitissem operar em toda faixa de vazões correspondentes a potências de 10% a 100% da potência nominal. Com a comprovação do bom desempenho da turbina e demais equipamentos na condição de geração abaixo de 25%, os estudos foram submetidos à aprovação do fabricante e o “de acordo” do ONS através da atualização dos Procedimentos de Rede. A partir de 21 de março de 2013 as unidades geradoras passaram a operar com potência mínima de 10 MW.

Salienta-se que nos últimos dois anos, desde adoção da operação nesse novo limite, não foi necessária nenhuma parada total da usina por restrição de vazão afluente no Rio Itajaí-Açú, resultando em ganho de geração correspondente aos dias em que ocorreram vazões menores que para a geração de 23 MW.

Os resultados obtidos demonstram a valia dessa abordagem, que poderá ser usada para identificar possibilidade de melhorar a flexibilidade operativa de outras turbinas hidráulicas que também operam a fio d’água ou que necessitam operar em baixas vazões turbinadas por alguma restrição de despacho (limitações no gerador, transformador elevador, restrição do sistema ou requisitos ambientais).

12.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Cavitação em Turbinas Hidráulicas do Tipo Francis e Kaplan no Brasil – CALAINHO, J. A. L.; GONÇALVES, C.; HORTA, C. A.; LOMÔNACO, F. G. – XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica – SNPTEE – Foz do Iguaçu, PR, 1999.
- (2) Sistema Neuro-Genético de Detecção e Qualificação de Cavitação – FREITAS, L. T. L. de; NETO, J. S. – XIII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia – SNPTEE – Florianópolis, SC, 1995.
- (3) HyCon 400 – Manual de Operação e Manutenção do Sistema de Monitoramento – Voith HydroGeneration, 2009.

13.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Fernando Pedrassani Costa Neves

Engenheiro Eletricista graduado pela UFSC (1993), natural de Caçador/SC, 1968. Trabalha desde 1994 no Setor Elétrico, Gerente de O&M da UHE Salto Pilão (2009-2013). Atualmente consultor em sistemas de potência da Nytech Engenharia de Sistemas.



Clóvis Ollé Fischer Santos

Engenheiro Eletricista graduado pela UFRGS (1976), natural de Bagé/RS, 1954. Trabalha com Geração de energia elétrica desde 1977. Responsável pelo suporte técnico da OPERSUL ENERGIA desde 2009, empresa responsável pela operação e manutenção da UHE Salto Pilão.