

Grupo de estudo de geração hidráulica-GGH

Benefícios da otimização contínua e automática da curva de conjugação de turbinas kaplan e bulbo sobre as condições de vibração e cavitação

Gosmann, Rodrigo P. (1); Menarin, Henrique A. (1); Quadrelli, Alessandro (2); Weiss, Leonardo A. (1); REIVAX(1); ENEL Green Power(2)

RESUMO

Turbinas Kaplan e Bulbo são capazes de manter altos valores de eficiência para amplas faixas de operação devido à dupla regulação, que permite o ajuste tanto da abertura do distribuidor quanto das pás do rotor. Essa combinação ótima pode ser também relevante para a melhor conservação do maquinário. Assim, quando em operação com a melhor combinação, pode ocorrer também a redução do desgaste da unidade. O trabalho avalia os resultados obtidos após a instalação de um sistema de cálculo e atualização automática da combinação ótima, adotado em 3 diferentes usinas. Os resultados foram obtidos com o suporte da Enel Green Power em três de suas unidades geradoras, cada uma com características diferentes de operação e monitoramento.

PALAVRAS-CHAVE

Otimização de eficiência hidráulica, desgaste mecânico, turbinas Kaplan e bulbo, cavitação, vibração

1.0 - INTRODUÇÃO

Mesmo com o crescimento da utilização de energias de fontes renováveis, como eólica e solar, a energia hidroelétrica ainda é a mais significativa e a eficiência de geração possui impacto em fontes de energia não renováveis como comentado em [1]. Ao mesmo tempo que a instalação de novas usinas aumenta a capacidade instalada, ainda assim um esforço deve ser empregado para manutenção e aumento da eficiência de instalações já existentes. Para turbinas Kaplan e Bulbo, a curva de conjugação (CC) define a relação entre a posição do distribuidor (Y_{ga}) e o ângulo da posição das pás da turbina (Y_{ru}) que maximiza a eficiência hidráulica para uma dada queda. Como resultado, estas turbinas podem alterar o ângulo de ataque da água, permitindo a turbina o funcionamento em uma ampla faixa de quedas, como comentado por [2].

A CC é geralmente fornecida pelo fabricante da turbina, com base em modelos em escala ou de simulação computacional. Na prática, a CC deve ser identificada de acordo com as condições reais de funcionamento na usina por meio de um ensaio chamado *index test*. O ensaio, definido em [3], é resumidamente descrito como: com intuito de encontrar a condição ótima, Y_{ru} é fixada em uma dada posição enquanto Y_{ga} é alterada para se avaliar a eficiência. Este procedimento é repetido para uma faixa plausível de posições de Y_{ru} .

A CC está sujeita a alterações com o passar do tempo, devido a desgastes dos componentes mecânicos ou manutenção dos componentes das unidades geradoras. Um exemplo de alterações da CC pode ser visualizado na FIGURA 1. Assim, para operar uma unidade no ponto de máxima eficiência, uma única execução do *index test* não é suficiente, em vez disso uma avaliação contínua da CC é desejável.

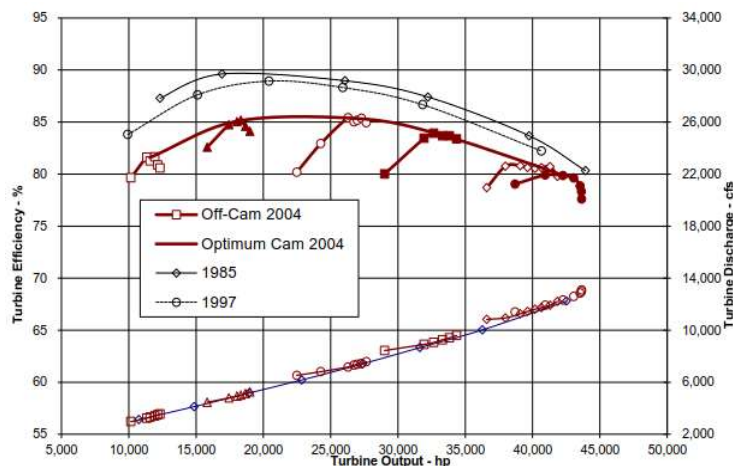


FIGURA 1 - Alteração da CC em função do tempo, apresentado por [4].

1.1 Rendimento hidráulico e Desgaste do maquinário

A operação de turbinas Kaplan e Bulbo em ótima CC traz uma série de vantagens, tanto para a empresa geradora quanto para o sistema. A utilização do sistema ECCO (*Efficiency and Combination Curve Optimization*), capaz de otimizar a CC, aumentou a eficiência hidráulica da turbina nas 3 unidades onde o sistema está instalado, estudo de caso apresentado em [5]. As três unidades em que o sistema foi instalado pertencem à Enel Green Power, que também forneceu a disponibilidade das unidades, suporte à instalação e acompanhamento técnico. O sistema ECCO foi capaz de aumentar a potência elétrica e reduzir o consumo de água. Para pequenas hidrelétricas, o consumo de água é relevante, uma vez que o reservatório não armazena água para longos períodos. Já para grandes hidrelétricas, a economia de água é importante para manter a geração em períodos de seca, reduzindo a necessidade de despacho de plantas não-renováveis e seus elevados custos de produção, tanto financeiros quanto ecológicos.

Segundo [6], os danos em turbinas ocorrem principalmente devido a problemas de cavitação, fadiga, falha de materiais e erosão por areia. A minimização de tais danos permite o aumento da eficiência operacional da usina, aumentando-se a disponibilidade da máquina no sistema elétrico.

Deseja-se investigar se um otimizador de CC é capaz de melhorar indicadores que se relacionam com os danos da máquina, sendo poucos os estudos sobre o tema. Quando em CC ótima, a turbina estará menos susceptível aos efeitos de cavitação de bordo de ataque e de vórtice no tubo de sucção, segundo [7].

Visando trazer mais dados experimentais como referência técnica, este trabalho foi concebido. O desgaste da turbina será mensurado através da avaliação de 3 temas, pois acredita-se que a alteração da CC pode causar impacto nestes: vibração, cavitação e temperatura do mancal.

1.1.1 Vibrações

A grande maioria das hidroelétricas opera há décadas e, em muitas delas, o ponto de operação atual é diferente do ponto originalmente escolhido em projeto. Segundo [8], quando a turbina opera fora da condição nominal, podem ocorrer severas vibrações devido a flutuações de pressão.

As vibrações causam fadiga [9], que por sua vez podem causar rachaduras na turbina, conforme apresentado em [10]. Segundo [11], também afetam os mancais, pois os problemas de vibração podem causar a fratura do mancal. De acordo com [12], o stress de flexão no eixo girante é a principal causa de fadiga, e o stress de flexão pode ser mantido baixo caso as vibrações sejam controladas para um nível baixo. Em [13], é mencionado que as forças de excitação atuantes sobre a turbina podem levar ao danos das pás. As três principais fontes de vibração do eixo são mencionadas em [14], classificadas em: vibração como resultado de forças mecânicas, forças hidráulicas e forças elétricas.

1.1.2 Cavitação

O desgaste de cavitação ocorre devido ao colapso de bolhas de vapor perto das partes das turbinas, causando erosão do material e também dissipação de energia na forma de ruído e vibração [15]. A cavitação é uma das principais causas de danos de turbinas, como mencionado em [6]. Além disso, turbinas do tipo reação são mais propensas ao fenômeno do que as de impulso [16].

Para detecção do fenômeno são usados medidores de emissão acústica (ultrassônicos) e acelerômetros de elevada banda de frequência de medição. O algoritmo de processamento de sinais em tempo real utilizado é semelhante ao apresentado em [7], muito embora no trabalho mencionado o autor tenha usado uma abordagem offline.

1.1.3 Temperatura do mancal

Indicações anormais na leitura de sensores do mancal podem ser um sinal de falha da superfície de deslizamento do mancal, deslocamento da superfície ou contaminação do óleo. A avaliação da condição de um mancal lubrificado a óleo pode incluir a medição de vibração e temperatura do mancal em operação, segundo [17].

Em [18], é mencionado que vibrações axiais irão causar instabilidade da camada de óleo podendo causar o dilaceramento da superfície, como consequência pode ocorrer aumento da temperatura no local.

2.0 - INSTRUMENTAÇÃO

Para a utilização do sistema de otimização de CC, deve-se instalar um painel especializado nesta função, capaz de realizar as medidas necessárias e movimentar os atuadores para as posições desejadas. Outro conjunto de instrumentos foi requerido para avaliar os indicadores que calculam o desgaste da turbina. Diferentes sistemas de monitoração foram instalados nas usinas e podem ser visualizados na TABELA 1. Embora possuam um conjunto diferente de sistemas de monitoração, em todas elas o sistema ECCO de otimização de CC foi instalado. As três unidades geradoras pertencem à Enel Green Power, que forneceu o tempo de operação e suporte na instalação e monitoração dos sistemas.

TABELA 1 - Sistemas de monitoração de desgaste instalados

Local	Potência nominal (MW)	Monitor de vibração	Monitor de cavitação	Monitor de temperatura do mancal
Goiás	54	Sim	Sim	Não
Chile	12	Sim	Não	Não
Tocantins	4,7	Não	Não	Sim

2.1 Sistema de otimização de conjugação

O sistema de otimização é executado em uma unidade de processamento instalada dentro de seu painel. O painel contém fontes de alimentação, unidade de processamento, módulo de entradas analógicas e um módulo de entradas e saídas digitais. Uma IHM *touch-screen* é disponibilizada para operação do sistema. Na FIGURA 2, se observa um modelo de painel instalado. Maiores informações sobre o sistema podem ser obtidas em [5].

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG



FIGURA 2 - Paineis do sistema de otimização.

2.2 Sistema de monitoração de desgaste da máquina

O sistema de monitoração de desgaste de máquina é composto por 2 painéis distintos, um com programa de aplicação da empresa AQTech e o outro com programa de aplicação da Reivax. Os painéis podem ser visualizados na FIGURA 3. Cada painel é composto por uma IHM gráfica e possui um sistema de condicionamento de sinal compatível com os sensores aos quais estão associados. O sistema de monitoração de temperatura dos mancais não possui um painel específico, apenas medidores de temperatura que enviam suas medidas ao painel do regulador de velocidade da turbina.



FIGURA 3 - Esquerda: painel de detecção de vibração. Direita: painel de monitoramento de cavitação.

2.2.1 Sensores e processamento de sinais

A detecção dos sinais de vibração foi realizada conforme instruções presentes nas normas [19] e [20], através da utilização de medições provenientes de sensores de aceleração e de proximidade. A medição de temperatura do mancal foi realizada através da medição proveniente de elementos PT100, sem necessidade de pós-processamento.

Já para detecção do fenômeno de cavitação, são usados medidores de emissão acústica (ultrassônicos) e acelerômetros de elevada banda de frequência de medição. A intensidade do fenômeno da cavitação foi calculada usando uma adaptação do método descrito em [7]. O diferencial desenvolvido pelos autores do presente informe é permitir o monitoramento da cavitação em tempo real. O algoritmo é baseado na identificação

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

de frequências hidrodinâmicas que atuam como moduladores de amplitude do sinal captado. Dependendo do valor de frequência moduladora, uma determinada categoria de cavitação pode ser identificada.

Neste experimento, o sistema desenvolvido não tinha capacidade de calcular a cavitação em frequências inferiores às do giro do eixo da turbina. Assim, as frequências moduladoras capazes de serem avaliadas por este sistema de cavitação são a da passagem das pás e a da passagem das palhetas diretrizes. O sistema especificado não tinha a possibilidade de identificar a cavitação de vórtice no tubo de sucção.

2.2.2 Local de instalação

Na FIGURA 4, é mostrado o corte lateral de uma turbina do tipo Kaplan, em cada imagem é mostrada um conjunto de tipo de sensor. Em vermelho, os sensores que medem a vibração, em azul os que medem a cavitação, e em verde, os sensores que medem temperatura dos mancais.

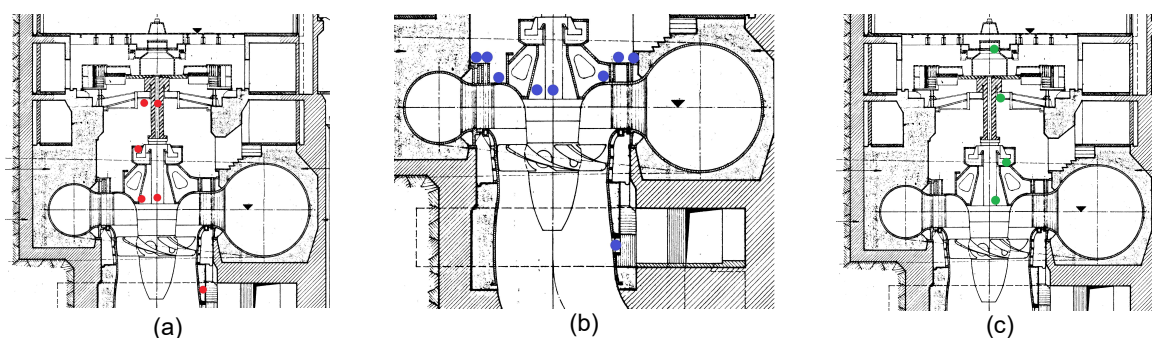


FIGURA 4 – (a) posição dos sensores de aceleração, (b) cavitação e (c) temperatura do mancal.

3.0 - SISTEMA DE OTIMIZAÇÃO DE CURVA DE CONJUGAÇÃO

O principal objetivo do sistema de otimização é o cálculo da CC durante testes online, com impacto mínimo no sistema existente e no ponto de operação da unidade. Uma vez que uma quantidade suficiente de dados esteja armazenada na base de dados do ECCO, é possível o cálculo de nova CC para a turbina. Após a coleta de dados para a fase de processamento, a CC foi calculada para uma série de quedas. Em todas as unidades, alguma diferença entre a CC original e a ótima calculada foi detectada, conforme pode ser visto na FIGURA 5. Isso evidencia a possibilidade de melhorias de eficiência hidráulica ao se utilizar uma CC ótima.

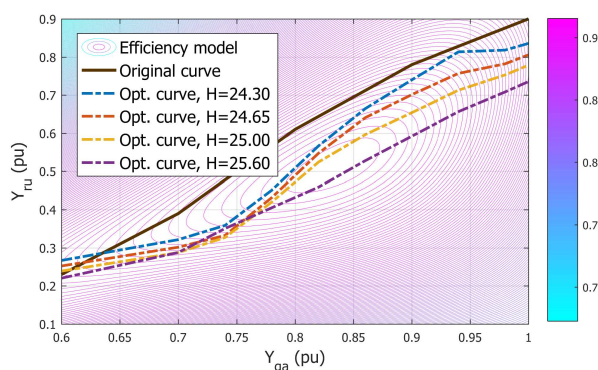


FIGURA 5 – Comparação da curva original e ótima para a unidade 2 (Chile).

Na próxima sessão, verifica-se se essa melhoria na CC a respeito da eficiência hidráulica também traz impacto na redução do desgaste da turbina.

4.0 - ENSAIOS

Para cada tema, a hipótese sob estudo é se a utilização de uma CC não otimizada (chamada de desconjugada) é capaz de piorar um dado indicador de desgaste. O teste desta hipótese não é possível de ser obtido em um estudo do tipo observacional, pois não ocorreria nenhuma alteração de CC. Assim, foi autorizada a execução de ensaios controlados, dentro dos limites operacionais possíveis em cada usina.

4.1 Vibração

O primeiro ensaio realizado foi do tipo observacional, enquanto o segundo foi do tipo controlado. Ambos foram realizados na usina do Chile.

4.1.1 Teste dinâmico – desconjugação transitória

Uma hipótese sob estudo é que a desconjugação é uma das causas do fenômeno de vibração. Em uma resposta a variação da condição de operação os atuadores Y_{ga} e Y_{ru} irão se movimentar, no entanto o Y_{ga} possui uma dinâmica de movimentação mais veloz em relação a Y_{ru} , podendo ocasionar uma desconjugação transitória na turbina. Ocorrendo uma variação da condição de modo abrupto então uma desconjugação transitória ocorrerá. Se exatamente durante este período de desconjugação transitória ocorrer aumento temporário de vibração, então é uma evidência de que a desconjugação se relaciona com o fenômeno da vibração. Então este tipo de ocorrência é útil para nossos estudos.

Esta ocorrência pode ser vista no registro da FIGURA 6, onde observa-se que no instante de tempo 3400 s, começa a condição devido ao movimento das pás (Y_{ru}) que provoca um erro acentuado de conjugação. Durante os 70 segundos seguintes, observa-se um aumento da vibração medida pelo sensor de proximidade D_Rad_90. Esse sensor é instalado para medir o deslocamento radial do eixo da turbina. D_Rad_90_Med é o valor médio medido pelo sensor, e D_Rad_90_PP o valor pico a pico numa janela móvel. Esse aumento acontece justamente no período de duração da desconjugação transitória e é normalizado quando as pás do rotor (Y_{ru}) são estabilizadas e o distribuidor (Y_{ga}) abre-se para regularizar a conjugação. Portanto, este ensaio traz uma evidência de que a desconjugação é uma das causas do fenômeno de vibração.

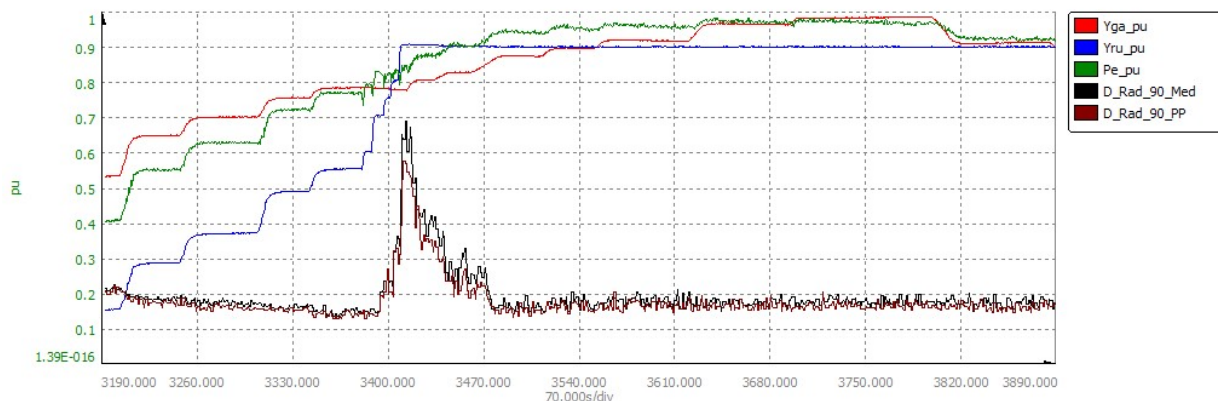


FIGURA 6 - Desconjugação transitória.

4.1.2 Teste estático – *index test*

O ensaio de *index test* consiste em executar um teste controlado em diferentes condições de conjugação, visando a identificar qual a conjugação ótima. Durante o ensaio de *intex test*, foi realizada a coleta dos dados de vibração e uma parte do ensaio pode ser visualizada na FIGURA 7.

Durante o período de tempo entre 3150 s e 3400 s, a posição do distribuidor (Y_{ga}) é mantida fixa em 60% enquanto se varia a posição das pás (Y_{ru}) acima de 24%, em patamares constantes. Observa-se aumento substancial da vibração, justamente no período de tempo de desconjugação. O aumento da vibração pode ser

visualizado nos dois sensores de proximidade instalados no eixo, que se encontram posicionados perpendicularmente no corte transversal do eixo. As medições na FIGURA 7 apresentam valores pico a pico fornecidos pelo processamento do software AQTech. Esta é mais uma evidência a respeito da hipótese de desconjugação ser uma das causas de vibração.

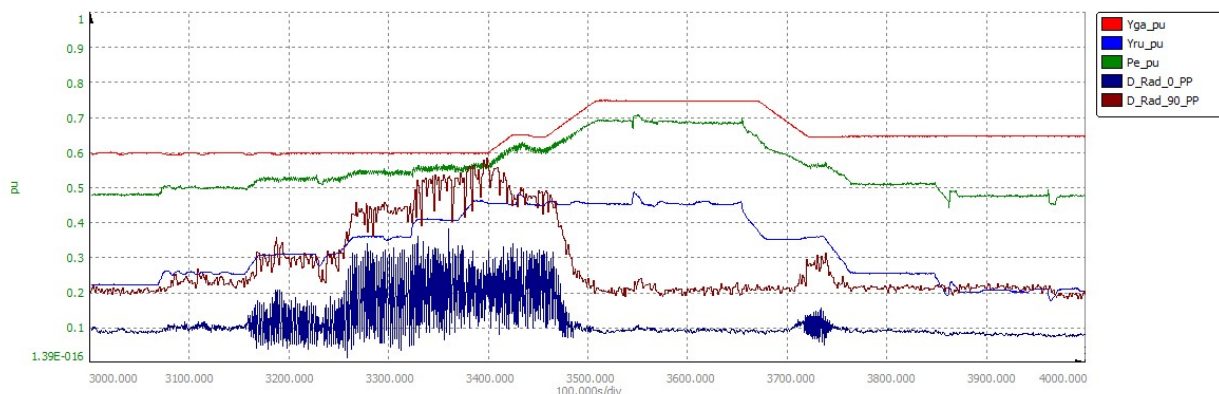


FIGURA 7 - Vibração durante *index test*.

4.2 Cavitação

Neste caso, um experimento do tipo fatorial completo foi planejado. O experimento consiste em coletar e analisar os dados com a turbina em condição de regime permanente. O ensaio consiste em registro de dados em 2 níveis de potência, 54 MW e 37,8 MW, 2 níveis de queda, 32 m e 34,7 m, e em 3 configurações de conjugação, totalizando 12 combinações. As 3 configurações de conjugação testadas foram: conjugada; com Y_{ru} deslocado em relação a condição de Y_{ru} ótima em +15% e também em -15%. Para cada combinação, foram obtidas 80 amostras. Muito embora tenha-se planejado o ensaio em 12 combinação, por restrições operativas da máquina, não foi possível coletar o ponto referente a potência 48,6 MW e com queda de 34,7 m, reduzindo-se a coleta para 9 combinações.

Os resultados podem ser observados na FIGURA 8, onde são exibidas 2 figuras, uma para cada queda testada. As cores representam um dado nível de potência testado e o eixo das ordenadas representa a amplitude da cavitação detectada. A representação de uma dada configuração da CC pode ser vista nos valores da escala do eixo das abscissas.

O efeito esperado é que para uma dada condição operacional (definida pela queda e potência) a conjugação reduza o efeito da cavitação na turbina nesta condição. Se a conjugação possuir este efeito então as leituras com legenda ON sempre serão as com menores amplitudes.

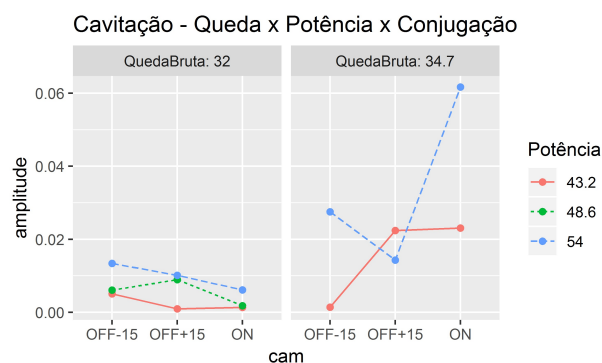


FIGURA 8 - Amplitude de cavitação em função de canal, conjugação e frequência moduladora.

Observa-se que, na imagem da esquerda, a configuração de on-cam é a que possui a menor amplitude para qualquer patamar de potência, sendo uma evidência a favor da hipótese de que a máquina conjugada cavita menos.

Ao se observar a imagem da direita, observa-se a ausência do conjunto de pontos referente a potência de 48,6 MW, reduzindo a quantidade de dados a serem analisados. Ao se comparar ambas as imagens se observa que para um mesmo patamar de potência, a amplitude dos sinais na imagem da direita é muito maior, de certa forma este comportamento é o esperado, pois a imagem da direita representa uma condição onde a turbina está submetida a uma queda maior e nesta condição existe maior propensão a cavitação, como mencionado em [21]. Na usina em questão, a variação da queda ocorre principalmente devido ao número de máquinas em operação, que altera o nível a jusante. Uma queda maior, portanto, está atrelada à redução do nível a jusante, e essa é uma condição que favorece a cavitação devido à queda da pressão no lado de sucção. Nesta queda não nominal não se possui evidência para se confirmar a hipótese originalmente sob estudo. Acredita-se que, nesta condição, o efeito predominante é o de cavitação devido a elevada queda, se sobrepondo completamente aos efeitos de conjugação.

A conclusão é que para uma condição de queda nominal existe evidência de que a desconjugação causa aumento da cavitação para todas as condições de potências, mas para uma condição de queda elevada não existe evidência desta relação. A condição de queda não nominal é admissível pela turbina, mas de forma alguma representa a condição ótima de projeto, podendo ocasionar efeitos secundários indesejados.

4.3 Temperatura do mancal

A avaliação do efeito da utilização de uma CC otimizada sobre a temperatura do mancal foi feito com base em um ensaio controlado. O ensaio foi realizado mantendo-se a turbina em uma dada condição operacional constante e comutando-se a curva de conjugação. Assim a variação em uma dada resposta irá evidenciar a contribuição do CC para o efeito.

Tal ensaio pode ser visualizado na FIGURA 9, com a comutação da CC (vermelho) ocorrendo no instante de tempo 11.500 s. Observa-se uma relação inversa entre a eficiência hidráulica (cinza) e a temperatura do metal do mancal de escora (T_{ME_M}), ou seja, ao se reduzir a eficiência hidráulica ocorre aumento da temperatura do metal do mancal de escora. Esta é uma evidência que reforça a hipótese de que uma melhor eficiência hidráulica da turbina pode resultar em menor temperatura do mancal de escora, podendo ser um indicativo de desgaste da máquina. Também é possível observar aumento da temperatura do óleo nos mancais inferior (T_{MIA_O}) e superior (T_{MSA_O}) do gerador.

Outra hipótese para a variação da temperatura do mancal pode ter como causa a alteração do perfil hidrodinâmico das pás da turbina. A alteração de CC pode resultar em alteração da componente de força longitudinal no mancal de escora, isso alteraria o carregamento do mancal e causaria um efeito significativo na temperatura local. A investigação da possibilidade de alteração de carregamento do mancal em função da alteração perfil hidrodinâmico está fora do escopo deste estudo, mas sugere-se a avaliação da contribuição deste fator em investigação futura sobre o tema. Isso permitiria a eliminação de tal hipótese como causa da variação da temperatura.

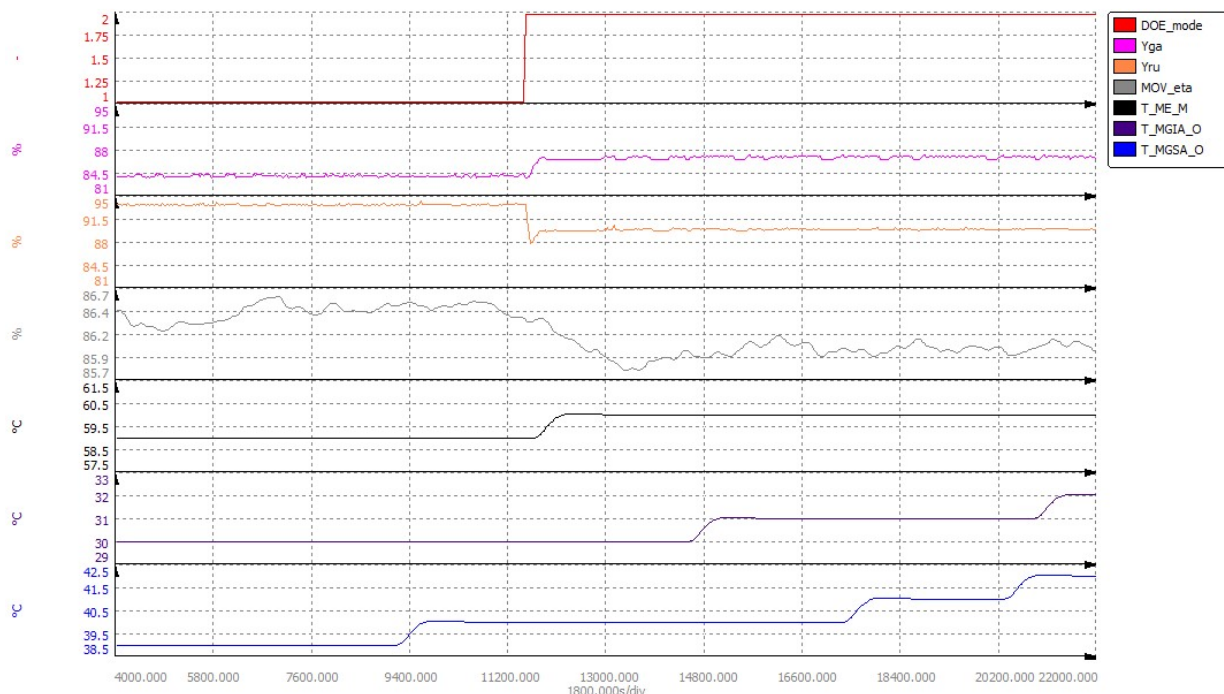


FIGURA 9 - Relação temporal entre temperatura do mancal e eficiência hidráulica.

5.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou dados experimentais sobre o impacto no desgaste da turbina ao se utilizar um sistema de otimização de curva de conjugação de turbinas de dupla regulação. O desgaste da turbina foi avaliado nos quesitos de vibração, cavitação e temperatura do mancal.

Na primeira análise, referente ao estudo da vibração, observou-se que durante operação desconjugada ocorreu aumento da vibração da turbina, confirmando-se a hipótese em estudo. Assim a melhora da curva de conjugação se mostrou uma medida possível para se reduzir as vibrações de uma máquina.

Na segunda análise, referente ao estudo de cavitação, foi mostrada evidência de que a operação desconjugada ocasionou aumento da intensidade da cavitação. No entanto a evidência só está presente quando a máquina opera sob queda nominal. Durante o funcionamento em queda elevada existem outros fatores que se sobrepõem, confundindo-se com o efeito da desconjugação, impedindo uma análise isolada deste fator nos resultados.

Na terceira análise, referente a temperatura do mancal, observou-se que a comutação da curva de conjugação alteração da temperatura do mancal. Trouxe assim uma evidência que reforça a hipótese de que uma melhor eficiência hidráulica pode resultar em menor temperatura do mancal. Em todo caso, são necessários estudos complementares para se excluir se a alteração do perfil hidrodinâmico das pás pode ser uma causa da alteração da temperatura.

A conclusão é que o otimizador automático da curva de conjugação teve efeito benéfico nos indicadores de desgaste avaliados, então não somente é capaz de aumentar o rendimento hidráulico da turbina como também é capaz de reduzir o desgaste da turbina.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F.R. FØrsund, Hydropower Economics, 2nd ed., Springer US, New York, 2015.

- [2] D.K. Okot, Review of small hydropower technology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 26 (2013) 515–520. doi:10.1016/j.rser.2013.05.006.
- [3] IEC 60041, IEC 60041:1991 - Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines, (1991).
- [4] Mesa Associates, Oak Ridge National Laboratory, Best Practice Catalog Propeller/Kaplan Turbine, (2011).
- [5] H.A. Menarin, R.P. Gosmann, L.A. Weiss, H.A. Costa, G. Fredo, E.C. Finardi, Automatic system for efficiency optimization and calculation of the combination curve of Kaplan and Bulb turbines, in: Recife, 2018.
- [6] A. Kjølle, Mechanical Equipment, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2001.
- [7] X. Escaler, E. Egusquiza, M. Farhat, F. Avellan, M. Coussirat, Detection of cavitation in hydraulic turbines, *Mechanical Systems and Signal Processing*. 20 (2006) 983–1007. doi:10.1016/j.ymssp.2004.08.006.
- [8] X. Liu, Y.Y. Luo, Z.W. Wang, Fatigue Analysis of the Piston Rod in a Kaplan Turbine Based on Crack Propagation under Unsteady Hydraulic Loads, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 22 (2014) 012017. doi:10.1088/1755-1315/22/1/012017.
- [9] H.-J. Huth, Fatigue Design of Hydraulic Turbine Runners, 2005. https://brage.bibsys.no/xmlui/bitstream/handle/11250/241313/125212_FULLTEXT01.pdf?sequence=1&isAllowed=y (accessed July 6, 2018).
- [10] X. Ruofu, Study on Dynamic Analysis of the Francis Turbine Runner-- 《Large Electric Machine and Hydraulic Turbine》 2001 年 S1 期, (n.d.). http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-DJ2001S1010.htm (accessed July 6, 2018).
- [11] S. Sohrab, International Association of Mechanical Engineers, World Scientific and Engineering Academy and Society, eds., Enhancing Efficiency of Kaplan Turbine by Implementing Advance Features: A Review, WSEAS Press, Athens, 2010.
- [12] T. Maricic, D. Haber, S. Pejovic, Standardization as Prevention of Fatigue Cracking of Hydraulic Turbine-Generator Shaft, in: *IEEE*, 2007: pp. 103–110. doi:10.1109/EPC.2007.4520314.
- [13] D. Braga, D. Coelho, N. Sure Soeiro, A. Mesquita, Numerical simulation of fluid added mass effect on a kaplan turbine runner with experimental validation, (n.d.) 2013.
- [14] B. Nevada, Measurement of shaft vibration on hydroelectric turbine generators, Nevada USA, 1985.
- [15] J.-P. Franc, J.-M. Michel, Fundamentals of Cavitation, Springer Science & Business Media, 2006.
- [16] P. Kumar, R.P. Saini, Study of cavitation in hydro turbines—A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14 (2010) 374–383. doi:10.1016/j.rser.2009.07.024.
- [17] M. ASSOCIATES, O. Ridge, Best Practice Catalog Kaplan, (2011). <https://hydropower.ornl.gov/docs/HAP/MechKaplanPropTurbineBestPractice1.pdf> (accessed July 24, 2018).
- [18] R. Nowicki, N. Morozov, G. Digital, G. Digital, Thrust bearing monitoring of vertical hydro-turbine-generators, (2017) 15.
- [19] ISO 10816-5, ISO_10816-5 Machines set in hydraulic power generating and pumping plants, (2000).
- [20] ISO 7919-5, MECHANICAL VIBRATION — EVALUATION OF MACHINE VIBRATION BY MEASUREMENTS ON ROTATING SHAFTS PART 5 MACHINE SETS IN HYDRAULIC POWER GENERATING AND PUMPING PLANTS, (2007).
- [21] S. Khurana, H. Singh, Effect of Cavitation on Hydraulic Turbines- A Review, *International Journal of Current Engineering and Technology*. (2012) 6.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Rodrigo P. Gosmann foi graduado em engenharia de controle e automação em 2008 pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Brasil. Desde então ele está trabalhando como engenheiro de P&D na REIVAX Automação e controle. Seus principais interesses são reguladores de velocidade e sistemas de controle avançados como controle preditivo.

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG



Henrique A. Menarin é mestre em Engenharia de Automação e Sistemas em 2013 na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Brasil, pelo trabalho de aplicação de MPC em sistemas de excitação e regulação de velocidade em usinas hidroelétricas. É graduado em engenharia de controle e automação em 2010 na UFSC, Brasil. Trabalha na REIVAX Automação e Controle desde 2008 com pesquisa e desenvolvimento de sistemas de controle para geração de energia.



Alessandro Quadrelli concluiu o mestrado em Engenharia Elétrica na Universidade de Pisa, Itália, no ano de 2010, quando ingressou na Enel Research & Innovation. Ele iniciou seus trabalhos com integração de geração distribuída à rede de média e baixa tensão, gestão de sistemas distribuídos, veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia, tanto em atividades de simulação/modelagem como em avaliação de tecnologias. Desde julho de 2016, passou a integrar a equipe da Enel Green Power/Innovation Hydro. Está envolvido em atividades de pesquisa em usinas hidrelétricas desde 2015, com foco em sistemas de controle e novas soluções para sensoriamento.



Leonardo A. Weiss foi graduado em engenharia de controle e automação em 2005 pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Brasil. Desde então ele está trabalhando na REIVAX Automação e Controle e já atuou como engenheiro, comissionador, supervisor e agora como coordenador de projetos de P&D. Suas maiores áreas de interesse são controle e automação de sistemas de geração de energia.