

OPERAÇÃO MONITORADA DE TURBINAS DO TIPO KAPLAN POR MEIO DE UM ALGORITMO COM INTERFACE INTELIGENTE EM REDES NEURAIAS

Igor Renan Braga dos Santos¹,

Oswaldo Honorato de Souza Júnior¹, Almir Luiz Rodrigues¹

¹Universidade Federal de Itajubá

RESUMO

Atualmente, um dos maiores problemas enfrentados pelas centrais hidrelétricas se trata da operação em situações críticas, visto que a usina e, por extensão, os grupos geradores de centrais de grande porte operam em função do despacho de carga e da vazão disponível. Com isso os grupos geradores, e principalmente, as turbinas hidráulicas trabalham em condições parciais que divergem do ponto ótimo de operação. Em tais situações, tem-se a presença de fenômenos indesejados e nocivos ao funcionamento dos equipamentos, a saber: cavitação, flutuações de pressão, flutuações de potência e sobreaquecimento dos mancais. Atualmente, o planejamento de manutenção de boa parte das centrais hidrelétricas se baseia em sistemas de monitoramento dos parâmetros operacionais e diagnóstico de possíveis problemas surgidos ao longo do tempo. Isto é, o planejamento se fundamenta em inspeções periódicas intrusivas, gerando custos com indisponibilidade das unidades geradoras, mão de obra e eventualmente com consumo desnecessário de material devido à imprevisão do momento adequado para o reparo. É comum em centrais hidrelétricas novas e repotencializadas, a instalação de sensores para monitorar os níveis de vibração dos grupos geradores, visto que cerca de 80% das falhas em grupos geradores são detectáveis pela vibração. Entretanto, ainda não são utilizadas técnicas de aprendizagem por redes neurais associadas a estes sinais para o monitoramento do comportamento da máquina. Neste artigo, aborda-se uma revisão bibliográfica sobre o tema, levantando o estado da arte desta tecnologia, com a finalidade de discutir os meios possíveis e viáveis de detecção dos fenômenos nocivos à operação de turbinas, mais especificamente do tipo Kaplan, por meio da utilização de técnicas de redes neurais artificiais. E, por meio do estado da arte, avalia-se a possibilidade do desenvolvimento de um sistema de monitoramento e suporte à operação de grupos geradores utilizando estas técnicas.

Palavras chave: Monitoramento; Grupos geradores; Rede Neural Artificial.

MONITORED OPERATION OF KAPLAN TURBINES THROUGH AN ALGORITHM WITH INTELLIGENT INTERFACE ON ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Igor Renan Braga dos Santos¹,
Oswaldo Honorato de Souza Júnior¹, Almir Luiz Rodrigues¹

¹Federal University of Itajubá

ABSTRACT

One of the biggest problems faced currently by hydroelectric power plants is the operation in critical situations, because the plants and, by extension, the generators sets operate in function of the energy required by National System Operator (NSO) and the available flow. Thus, the generator sets, and especially the hydraulic turbines, operate in partial conditions that diverge from the optimum point determined by the manufacturers. In such situations, there are undesired and harmful phenomena to the operation of the equipment, such as: cavitation, pressure fluctuations, power fluctuations and overheating of the bearings. Currently, maintenance planning for most hydroelectric power plants is based on systems to monitor operational parameters and diagnose possible problems that may arise over time. The planning is based on periodic intrusive inspections, result in costs with the unavailability of the generating units, labor, and, possibly, with unnecessary consumption of material due to the unforeseen moment of the maintenance stop. The installation of sensors to monitor the vibration levels of generator sets is usual in new and refurbished hydroelectric power plants, since about 80% of failures in generator sets are detectable by vibration. However, learning machine techniques by artificial neural networks associated with these signals of sensors are still not used to monitor the behavior of the machine. In this article, a bibliographical review on the theme is presented, addressing the state of the art of this technology, with the purpose of discussing possible and feasible means of detecting phenomena harmful to the operation of turbines, especially of the Kaplan type, using artificial neural network techniques. And, through the state of the art, the possibility of developing a monitoring and support system for the operation of generator sets using these techniques is evaluated.

Key words: Monitoring; Generator and turbine; Artificial Neural Network.

1. INTRODUÇÃO.

Atualmente, um dos maiores problemas enfrentados pelas centrais hidrelétricas se trata da operação em situações críticas, visto que a usina e, por extensão, os grupos geradores de centrais de grande porte operam em função do despacho de carga e da vazão disponível. Dessa forma, as centrais ficam expostas à situações distintas das condições ideais, como no caso de

baixos níveis do reservatório por necessidades à jusante, exigências do sistema elétrico, ou mesmo, em períodos secos trabalhando em condições de baixas vazões e consequentemente redução de carga. Em decorrência disto, muitas centrais têm operado suas turbinas fora da sua zona de operação e sob condições de intensa vibração.

Dessa maneira, o planejamento de manutenção de boa parte das centrais hidrelétricas se baseia em sistemas de monitoramento dos parâmetros operacionais e diagnóstico de possíveis problemas surgidos ao longo do tempo. No entanto, a maioria desses sistemas disponíveis se encontram fundamentados em inspeções periódicas intrusivas, gerando custos com indisponibilidade das unidades geradoras, mão de obra e eventualmente com consumo desnecessário de material devido à imprevisão do momento adequado para o reparo.

É comum em centrais hidrelétricas novas e repotencializadas a instalação de sensores para monitorar os níveis de vibração dos grupos geradores. Entretanto, ainda não são utilizadas técnicas de aprendizagem por redes neurais associadas a esses sinais para monitorar o comportamento da máquina. Atualmente, as técnicas de emissão acústica (isto é, a utilização desses sinais) vêm sendo amplamente desenvolvida e aplicada quase que exclusivamente para detecção e monitoramento do fenômeno da cavitação. E mesmo neste campo, a tecnologia não se encontra consolidada, sendo um enorme desafio devido à natureza complexa do fenômeno e a fatores que tendem a influenciar a natureza da excitação e que são determinantes na trajetória da transmissão dos sinais do sensor, tais como a contaminação dos sinais por ruídos provenientes de outras fontes de excitação, sejam hidrodinâmicas, mecânicas ou eletromagnéticas.

Neste artigo, elabora-se uma revisão bibliográfica sobre o tema, com a finalidade de discutir os meios possíveis e viáveis de detecção dos fenômenos nocivos à operação de turbinas. Restringe-se o desenvolvimento do sistema de monitoramento às turbinas hidráulicas do tipo Kaplan, as quais são adequadas para usinas hidrelétricas de média e baixas quedas. O rotor das turbinas do tipo Kaplan possui pás que podem ser ajustáveis, variando o ângulo de acordo com a demanda de potência. Dessa forma, permitem uma ampla variação da descarga e da potência sem apreciável variação do rendimento total.

Este artigo avalia também a possibilidade do desenvolvimento de um sistema de monitoramento dos fenômenos das diversas perturbações no grupo gerador por meio da assinatura da vibração provocada por esses fenômenos com a turbina operando sob diferentes condições, de forma a definir um protocolo de operação e manutenção preditiva minimizando os danos advindos dessas ocorrências e alertar o operador quando a máquina estiver operando fora de suas condições nominais. Dessa forma, espera-se que a turbina opere em melhores

condições, ficando menos suscetível a danos físicos e a perdas devido à queda de rendimento, promovendo a recuperação do rotor e partes da turbina, minimizando assim, as horas paradas necessárias à manutenção da máquina, com significativa redução de custos, aumento da segurança operacional e confiabilidade do sistema elétrico.

A possibilidade de detecção é fundamentada nas medições de vibração, objetivando estabelecer um padrão para o monitoramento por meio de redes neurais, o qual fundamentado na associação entre esses fenômenos vinculados a processos de manutenção preditiva e que represente um diferencial de análise, permitindo que a partir de um campo básico inicial operacional, se possa contornar e avaliar esses fenômenos on-line, de maneira à ampliar este campo por meio de um sistema inteligente que avalie os limites operacionais em quaisquer pontos de operação.

2. MATERIAL E MÉTODOS.

No contexto deste trabalho, é sabido que é crescente o interesse no setor elétrico em meios possíveis e viáveis para a detecção dos fenômenos nocivos à operação de turbinas do tipo Kaplan. Um levantamento da atual conjuntura da tecnologia de monitoramento de grupos geradores aliado a recente descoberta de modelos neurais artificiais se torna extremamente interessante principalmente em função dos benefícios dessa associação. Uma vez consolidado um sistema de monitoramento das condições operacionais dos grupos geradores utilizando técnicas de redes neurais, isto implicará em uma operação otimizada com uma série de benefícios, sendo os principais: os ganhos de energia média gerada, com a ampliação da faixa operacional; aumento da vida útil dos equipamentos e redução dos custos operacionais, impactando de maneira positiva no planejamento de manutenção, substituindo os sistemas de monitoramento atuais, os quais se baseiam atualmente no monitoramento dos parâmetros operacionais e diagnóstico de possíveis problemas surgidos ao longo do tempo. Os sistemas atuais apresentam inspeções periódicas intrusivas, gerando custos com indisponibilidade das unidades geradoras, mão de obra e eventualmente com consumo desnecessário de material devido à imprevisão do momento adequado para o reparo.

Os dados a respeito do monitoramento de grupos geradores utilizando técnicas de inteligência artificial foram coletados por meio de um estudo sistematizado da literatura. Além do “*how know*” dos autores em monitoramento e comissionamento de grupos geradores, foram buscados trabalhos relacionados ao tema que foram publicados em revistas ou anais de congressos indexados nas bases de dados ISI *Web of Science* (WOS) da *Thomson Reuters* e *Scopus* da *Elsevier Science*. Esse estudo bibliográfico sistematizado permitiu a elaboração de

um panorama do estado da arte dos estudos e considerações a respeito da utilização de técnicas de inteligência artificial no monitoramento de grupos geradores.

3. RESULTADOS, DISCUSSÃO E CONCLUSÃO.

3.1. Detecção e monitoramento dos principais fenômenos utilizando redes neurais.

3.1.1. Contexto

O processo de perturbação em turbinas hidráulicas é geralmente causado por oscilações de pressão e vibração, vortex de sucção, variações radiais nos mancais, turbulências e variação de pressão no conduto e na tampa da turbina. Estas condições, as quais ocorrem na dinâmica operativa, ocasionam danos físicos à máquina. Estes danos resultam em perdas financeiras para as concessionárias relacionadas ao custo de recuperação da máquina e, principalmente, devido às horas de indisponibilidade do grupo gerador. Essas horas são contabilizadas diretamente na Taxa Equivalente de Indisponibilidade Forçada (TEIF) que, se extrapolar o valor de referência estipulado pela ANEEL, poderá repercutir em penalizações por não atendimento da garantia física. Em uma usina hidrelétrica de grande porte, por exemplo, com a TEIF de cerca de 9% (MME, 2019), há, conseqüentemente, um comprometimento de, aproximadamente, 54 MW médios devido às falhas.

Visto que a usina e, por extensão, os grupos geradores de centrais de grande porte operam em função do despacho de carga e da vazão disponível, muitas vezes eles o fazem em situações críticas e fora da sua zona de operação o que resulta na operação sob condições de intensa vibração.

As turbinas são projetadas para operar em condições específicas e dentro de um limite operacional definido inicialmente pelo fabricante. Esta definição é realizada com base em ensaios de modelos para a turbina ou, quando não se dispõe de modelos, na transposição de ensaios em modelos similares, visando o fornecimento do melhor desempenho possível na conversão de potência hidráulica em potência mecânica no eixo da turbina e, por consequência, potência elétrica na saída do gerador. Entretanto, não é raro a turbina trabalhar em situações distintas das condições ideais, como no caso de baixos níveis do reservatório, necessidades à jusante, exigências do sistema elétrico, ou mesmo em períodos secos trabalhar em condições de baixas vazões e conseqüentemente redução de carga. Tais circunstâncias podem ser capazes de promover perturbações danosas ao grupo turbina-gerador, o que limita substancialmente o campo operacional definido pelo fabricante.

Dentre essas condições danosas às turbinas, destaca-se também a cavitação. Este fenômeno é definido pela formação de bolhas no escoamento de um líquido preenchidas com

vapor d'água e/ou outros gases emulsionados. As bolhas são formadas em zonas do escoamento onde a pressão é inferior à de vaporização da água e em regiões próximas às pás da turbina ou no tubo de sucção. Quando formadas próximas à uma superfície como, por exemplo, as pás de uma bomba hidráulica ou de uma turbina, as cavidades e/ou bolhas podem causar danos ao material, resultando em um processo de erosão acelerado, podendo levar a rupturas estruturais das pás. Pode também causar erosão acelerada nas partes expostas de uma turbina, tais como cubo, coroa e aro de entrada dos tubos de sucção. Tal processo implica em uma redução na produção de energia. Portanto, uma das causas da cavitação é a exposição das turbinas às condições operacionais não ideais.

3.1.2. Detecção dos fenômenos

Como mencionado, cada vez mais, os grupos geradores, e principalmente, as turbinas hidráulicas trabalham em condições parciais que divergem do ponto ótimo de operação. Em tais situações, tem-se a presença de fenômenos indesejados e nocivos ao funcionamento dos equipamentos, a saber: cavitação, flutuações de pressão, flutuações de potência e sobreaquecimento dos mancais. O diagnóstico dessas situações evita grande perdas econômicas e minimiza as chances de ocorrerem acidentes. Dessa forma, técnicas capazes de estender o campo operacional desses equipamentos precisam ser desenvolvidas.

Com exceção da cavitação, cuja detecção e monitoramento ocorrem indiretamente por meio da análise de vibração, todos os outros fenômenos supracitados são passíveis de mensuração direta, por meio de sensores. Dessa forma, grande parte do estado da arte deste tema tem seus trabalhos voltados para o monitoramento da vibração.

Aproximadamente 80% das falhas em unidades geradoras de turbinas hidráulicas são identificadas em sinais de vibração. (ZHAO et al, 2005). Assim, a qualidade e desempenho de uma máquina ou equipamento é determinada pela amplitude de vibração. O excesso de vibração pode causar desgaste, falhas e ruído intenso.

Contudo, essas vibrações são de complexa análise, já que sofrem influências de fatores de ordem hidráulica, mecânica e elétrica/eletrônica que interagem entre si assumindo características não lineares, o que torna difícil estabelecer uma relação direta de causa e efeito. (MOHANTA et al, 2017; SHEN et al, 2000).

As falhas podem ocorrer ao mesmo tempo e em diferentes componentes e partes da unidade geradora. Sendo assim, há uma grande demanda em se classificar de forma eficaz as relações complexas de causas e seus sintomas resultantes (ZHANG et al, 2012). Nesse cenário, o monitoramento da condição de vibração é feito para avaliar as condições de desempenho em

tempo real dos equipamentos, fornecendo indícios antecipados de falha eminente, de modo a evitar manutenções desnecessárias.

O monitoramento de vibração consiste basicamente em descobrir e analisar mudanças nos parâmetros de frequência e amplitude da vibração. Por meio do processo de análise de espectro aplicado ao sistema inteiro, é possível identificar as características de vibração de cada componente individual para monitorar sua condição.

Mais especificamente, em relação ao monitoramento de vibração em turbinas hidráulicas, a análise se torna mais eficiente quando correlaciona outras grandezas medidas, em especial, parâmetros operacionais da máquina, tais como vazão volumétrica de referência, altura de queda líquida, oscilações radiais dos mancais, potência de eixo e oscilações de pressão no conduto, caixa espiral e sucção, dentre outras. Os locais tradicionais para a detecção e análise das vibrações são o mancal, a haste de lâminas diretrizes e a parede do tubo de sucção. (ESCALER et al., 2003).

Dessa forma, conclui-se que é possível o desenvolvimento de um sistema considerando tais parâmetros como dados de entrada para treinamento da rede neural, permitindo que o sistema apresente a capacidade de auxiliar o operador na tomada de decisões.

Neste âmbito, Unal et al. (2013) investigaram a aplicabilidade da rede neural *Perceptron* Multicamadas (MLP) no diagnóstico de falhas em mancais de rolamento, concluindo que este modelo neural, treinado com o algoritmo da retropropagação do erro, é capaz de adequadamente classificar os tipos de falha mecânica com uma taxa de acerto de 98%. Em relação a apenas os métodos de detecção de falhas, Gryllias e Antoniadis (2012) mostraram que, baseados nessas técnicas, é possível realizar o monitoramento de anomalias em mancais de rolamento mecânico, com taxas de acerto de 100%.

Chaubey et al. (2014) obtiveram resultados promissores quanto ao monitoramento, por meio de Redes Neurais Artificiais (RNA's), das condições de uso de eixos rotativos, e mostraram que as MLP's (treinadas por meio do algoritmo da retropropagação do erro) superaram os métodos estatísticos tradicionais.

Verma et al. (2015) obtiveram bons resultados, quanto a utilização de técnicas de aprendizagem para máquinas elétricas. No entanto, seu estudo se tratava de motores, objetivando a diferenciação de motores funcionamento perfeitamente dos defeituosos, podendo possivelmente ser estendido para geradores.

Um dos fenômenos que desempenha um papel importante principalmente em turbinas Kaplan (objeto de estudo deste projeto) e merece uma atenção especial nesse tipo de análise se trata da cavitação. Flaspöhler (2007) afirma que, no caso de turbinas Kaplan, a entrada do rotor

pode ser considerada bastante suscetível para a ocorrência do fenômeno de cavitação. Em seções da máquina dotadas de uma alta velocidade da água, a cavitação pode também se elevar, tendo diversas variáveis intervenientes no processo, como a geometria da turbina, suas condições de operação e localização.

Dessa forma, encontram-se alguns trabalhos na literatura científica, os quais serão explanados na sequência, que abordam a utilização de técnicas de emissão acústica em máquinas hidráulicas com o enfoque voltado exclusivamente à detecção e ao monitoramento do fenômeno de cavitação. No entanto, não se encontrou nenhum registro de trabalhos que visassem o monitoramento *online* da turbina hidráulica objetivando identificar quaisquer perturbações advindas do grupo gerador, isto é, sob diferentes condições e restrições operacionais, sendo a cavitação apenas um destes fenômenos.

Neste contexto, Huixuan et al. (2007) desenvolveram um sistema de monitoramento *on-line* para turbinas hidráulicas, e como frisado, o mesmo trata exclusivamente da detecção da cavitação. Neste sistema foram monitorados de forma contínua sons na faixa de frequências audíveis (20 Hz – 20 kHz) e ultrassom (50 – 300 kHz). As características do sinal, como desvio-padrão, nível sonoro e composição em frequência foram analisadas pelos autores, conforme as condições de operação da máquina, assinaladas pela altura de queda (H) e pela abertura do distribuidor (ou potência de saída). De acordo com a análise em frequência, o ruído emitido pela cavitação foi diferenciado dos produzidos pelo fluxo e pelos de origem mecânica. Desse modo, a intensidade de cavitação em diferentes alturas e potência foi delineada. Com base em uma condição fixa de operação e a intensidade de cavitação, foi possível estimar o grau de erosão de cavitação. O sistema de monitoramento desenvolvido tem sido aplicado na usina hidrelétrica de Gezhouba, na China.

Lahdelma e Juuso (2008) também estudaram novas formas de se aplicar as técnicas de análise de vibração ao monitoramento de turbinas hidráulicas do tipo Kaplan. Mais especificamente eles partiram do princípio de que não somente a aceleração (derivada de segunda ordem) como também as derivadas de ordem mais altas podem ser utilizadas para caracterizar a presença ou ausência da cavitação e, por fim, os autores apresentam um fator de momento generalizado para a caracterização estatística do padrão vibratório. Gruber et al.

(2014) também atestam que tanto as RNA's quanto as árvores de decisão são capazes de diferenciar o padrão vibratório cavitante do não-cavitante em turbinas hidráulicas.

Franc et al. (1995) afirmam que a vigilância baseada na vibração em máquinas hidráulicas aponta uma correlação importante entre as medidas diretas de velocidade de erosão e as medidas dos níveis de aceleração da vibração, abaixo de 10 kHz. Tal procedimento

experimental para a detecção consiste na instalação de um acelerômetro de grande frequência de ressonância o mais próximo possível do rotor submetido à erosão provocada pela cavitação. Assim, uma amplitude em uma determinada banda de frequências pode ser cotejada com diversas condições de operação por meio da computação do (autopower spectrum) espectro dos sinais temporais.

Vórtices de sucção e perturbações hidráulicas com importante flutuação de volume provocam perturbações no fluxo principal e resultam em pulsações de pressões fortes no interior do sistema hidráulico. É o caso da trança no tubo de sucção em certas condições de vazão. Transdutores de pressão, montados na parede do tubo de sucção, podem detectar estas oscilações de baixas frequências. Caso a intensidade da flutuação seja forte, a detecção pode ser obtida também pela vibração estrutural. Portanto, nessa situação o procedimento se detém a analisar o conteúdo em frequência dos sinais de vibração e de pressão dentro da faixa de baixas frequências bem como em outros pontos da turbina onde os sensores podem ser posicionados: na cobertura, na parede do tubo de sucção, parede da tampa de inspeção e no mancal de guia e escora da turbina.

Ainda neste âmbito, Souza et al. (2017) identificaram a assinatura espectral da cavitação em uma turbina hidráulica, instalada no Laboratório Hidromecânico de Pequenas Centrais Hidrelétricas (LHPCH), do Centro Nacional de Referências em Pequenas Centrais Hidrelétricas (CERPCH), na Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). O espectro adquirido, juntamente com os parâmetros operacionais da máquina como: pressão, vazão e temperatura foram utilizados como dados de entrada para uma rede neural *Perceptron* Multicamadas (MLP) com o objetivo de prever a ocorrência da cavitação em função da abertura do distribuidor e da diferença de pressão entre a entrada e a saída da turbina.

Como se pode observar, à princípio, há a possibilidade do desenvolvimento de um sistema suporte à operação de grupos geradores por meio de técnicas de aprendizagem por redes neurais. A possibilidade é fundamentada em um modelo estatístico cujos parâmetros serão ajustados com o propósito de construir um classificador o qual, quando alimentado com os dados advindos dos sensores que inspecionarão os vários aspectos da máquina, será capaz de diferenciar o comportamento vibratório das perturbações no grupo gerador operando sob diferentes condições operacionais. Com efeito, tal informação, combinada com os dados de flutuação de pressão e outras situações indesejadas como o fenômeno de cavitação, permitirá que o sistema integrado de auxílio à operação ótima apresente o ponto mais adequado dentro do campo operacional da máquina.

Portanto, têm-se a possibilidade de aplicabilidade deste sistema a qualquer unidade geradora, permitindo-se monitorar o comportamento da máquina, dando suporte para o operador proceder com os cuidados necessários para minimizar os danos físicos advindos e as paradas da máquina para fins de manutenção. No entanto, há alguns pontos relevantes a serem salientados, tais como: estabelecidos os limites e as faixas operacionais adequadas à operação que minimizarão efeitos danosos, pulsações de pressão e vibrações radiais do eixo e mancais, e treinado o algoritmo inteligente por redes neurais, a que, a partir destes pontos poderá sinalizar, indicar e alertar quanto a pontos indesejados de operação na unidade, o sistema servirá especificamente para esta máquina. Caso se deseje instalar o sistema em outra unidade, será necessário treinar novamente a rede neural para as novas condições operacionais da unidade geradora desejada. Dessa forma, somente os pesquisadores, com conhecimento do algoritmo e com suas experiências, poderão ajustar novas condições de contorno operacional em relação ao campo de operação, no sentido de ampliar ou restringir pontos danosos, e de se aplicar o sistema em diferentes unidades geradoras.

4. AGRADECIMENTOS.

À Retiro Baixo Energético S.A. (RBE);

Ao Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas (CERPCH); À Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).

5. REFERÊNCIAS.

CHAUBEY, A.; CHELLADURAI, H.; LAMBA, S. S. Condition monitoring of rotating shaft using virtual instrumentation. In: 5th International and 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference. [S.l.: s.n.], 2014. p. 557–(1–6).

ESCALER, X.; FARHAT, M.; EGUSQUIZA, E.; AVELLAN F. Vibration Cavitation Detection Using Onboard measurements. In: CAV 2003 Fifth International Symposium on Cavitation. Proceedings. Osaka, Japan, November 1-4, 2003. P. 1-7

FLASPÖHLER, T.. Design of the runner of a Kaplan turbine for small hydroelectric power plants. Tese Doutorado. Tampere: University of Applied Sciences, 2007.

FRANC, J.P., AVELLAN, F., BELAHADJI, B., BILLARD, J.Y., BRIANÇONMARJOLLET, L., FRÉCHOU, D., FRUMAN, D.H., KARIMI, A., KUENY, J.L., MICHEL, J.M. La Cavitation: Mécanismes Physiques et Aspects Industriels. Grenoble: Presses Universitaires de Grenoble, 1995.

GRUBER, P. et al. The detection of cavitation in hydraulic machines by use of ultrasonic signal analysis. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, v. 22, n. 5, p. 052005, 2014. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/1755-1315/22/i=5/a=052005>>.

GRYLLIAS, K. C.; ANTONIADIS, I. A. A support vector machine approach based on physical model training for rolling element bearing fault detection in industrial environments. Engineering Applications of Artificial Intelligence (Elsevier), v. 25, p. 326–344, 2012.

HUIXUAN S.; ZHAOHUI L., YAXIONG B. An online cavitation monitoring system for large Kaplan turbines IEEE 2007;1 –16

LAHDELMA, S.; JUUSO, E. Vibration analysis of cavitation in kaplan water turbines. In: Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control. 2008.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Revisão dos valores de referência de indisponibilidade forçada (TEIF) e Programada (IP) de usinas hidrelétricas. 2019. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores/revisao-dos-valores>>. Acesso em: 01 maio 2019.

MOHANTA, R.; CHELLIAH, T.; ALLAMSETTY, S.; AKULA, A.; CHOSH, R. Sources of vibration and their treatment in hydro power stations-A review. Engineering Science and Technology, an International Journal, 20, 637–648, 2017.

SHEN, D.; CHU, F.; CHEN, S. Diagnosis and identification of vibration accident for hydrogenerator unit. Journal of Hydrodynamics, vol. 15, no. 1, pp. 129–133, 2000.

SOUZA, J. C. S.; MEIRA JUNIOR, R.; BIANCARDINE JUNIOR, H. S. D.; SOUZA JR, O. H.; TIAGO FILHO, G. L.; GALHARDO, C. R. Use of multi-layered perceptron neural

networks (mlp) for prediction of cavitation in hydraulic turbines. In: Latin American on Hydro Power & Systems Meeting, 2017, Quito. III Latin American on Hydro Power & Systems Meeting IAHR, 2017.

UNAL, M. et al. Fault diagnosis of rolling bearing based on feature extraction and neural network algorithm. Recent Adv. Electr. Eng. Ser, v. 10, 2013.

VERMA, A. K.; SARANGI, S.; KOLEKAR, M. Misalignment fault prediction of motor-shaft using multiscale entropy and support vector machine. In: EL-ALFY, E.-S. M. et al. (Ed.). Advances in Intelligent Informatics. Cham: Springer International Publishing, 2015. p. 359–370. ISBN 978-3-319-11218-3.

ZHANG, X.; ZHOU, J.; GUO, J.; ZOU, Q.; HUANG, Z. Vibrant fault diagnosis for hydroelectric generator units with a new combination of rough sets and support vector machine. Expert Systems with Applications, 39, 2621–2628, 2012.

ZHAO, D; MA, W; LIANG, W.-K; LUO, X.-Q. Data fusion fault diagnosis and simulation of hydroelectric units vibration. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, vol. 25, no. 20, pp. 137–142, 2005.