

Desenvolvimento de Sistema para Avaliação da Condição de Conjuntos Hidrogeradores em Função de Agentes Estressores

Jonas Guedes Borges da Silva, Levy Ely de Lacerda de Oliveira, Erik Leandro Bonaldi, Germano Lambert-Torres, Marcelo Curtinhas da Silva, Fábio Micerino, Luiz Eduardo Borges da Silva, Flávio Faria, Laurence Marques, José Mak e Adelfo Barnabé

Resumo – Este artigo apresenta o trabalho de desenvolvimento de um sistema de *hardware* e *software* para avaliação da condição de componentes de hidrogeradores em função de agentes estressores. O ponto de partida deste sistema foi o monitoramento de parâmetros da condição do hidrogerador e dos motores de seus sistemas auxiliares. Para tanto, foram utilizados sistemas de monitoramento de assinatura elétrica, vibracional e acústica. Em seguida, foram desenvolvidas ferramentas para identificação e registro das situações estressoras com base nos parâmetros operativos e nas assinaturas adquiridas pelos sistemas de monitoramento. Por fim, uma metodologia foi proposta para correlacionar o impacto desses agentes estressores na condição do conjunto em função dos parâmetros de desgaste oriundos dos sistemas de monitoramento preditivo instalados. A redução de paradas não-programadas e a melhor programação de paradas programadas, são outras vantagens advindas naturalmente da aplicação do sistema.

Palavras-chave – Agentes Estressores, Análise de Assinatura Elétrica, Análise de Vibração, Cavitação, Hidrogeradores.

I. INTRODUÇÃO

Pela incontestável importância no sistema elétrico, as unidades hidrogeradoras vêm recebendo cada vez mais atenção em termos de monitoramento da condição para a prevenção de falhas. Todas as partes da unidade geradora que apresentem possibilidade de parada catastrófica, implicando em perdas por lucro cessante, multas por indisponibilidade de fornecimento e os próprios custos associados à manutenção, são interessantes para inclusão em programas de monitoramento e manutenção preditiva. A turbina é uma dessas partes fundamentais que devem ter sua condição monitorada.

A mensuração dos efeitos da cavitação e de outras causas estressantes tem sido feita através de paradas periódicas de

conjuntos hidrogeradores para manutenção preventiva e corretiva, única alternativa que se apresenta para garantir o funcionamento confiável e a disponibilidade dos conjuntos hidrogeradores.

Este projeto apresenta uma metodologia para se estabelecer, dentro da rotina de manutenção dos hidrogeradores, o ideal da programação de paradas com base na análise da condição, evitando-se: longos períodos de indisponibilidade desnecessários, capacidade de geração suprimida e, conseqüentemente, lucro cessante.

Nos transformadores de potência, a manutenção evoluiu de corretiva para preventiva e de preventiva para preditiva durante as últimas décadas. Esta evolução permitiu que se saísse de uma situação de paradas anuais para uma situação de intervenções no ponto de menor custo operacional, resultando-se em poucas paradas durante as suas vidas úteis. Da mesma forma, o estabelecimento do ponto ótimo para intervenção no conjunto dos hidrogeradores tem sido uma aspiração do setor elétrico.

Neste sentido, o presente trabalho busca o desenvolvimento de um programa avançado de manutenção preditiva. Este programa está baseado no desenvolvimento de um sistema inteligente e *on-line* de avaliação da condição dos componentes de hidrogeradores. Neste desenvolvimento, foca-se, principalmente, as situações em que esta perda de vida útil se deve à cavitação e às alterações de regime operacional, aqui denominados agentes estressores.

Atualmente, algumas empresas do setor elétrico já adotam sistemas de mercado como Bently Nevada e Vibrosystem para a análise de vibrações em unidades geradoras. Neste desenvolvimento, foi utilizada também a técnica de análise da assinatura elétrica. O objetivo é aumentar a robustez do processo de identificação e detecção de falhas através do levantamento de novos parâmetros.

A aplicação de análise da assinatura elétrica é algo relativamente novo, mas que vem se difundindo cada vez mais em função de suas vantagens e facilidades, principalmente no monitoramento de motores de indução trifásicos.

Outra vertente do projeto foi o desenvolvimento de uma metodologia para realizar a complexa integração dos parâmetros da análise da assinatura elétrica, com os parâmetros da análise de vibração, com o sistema de controle de velocidade da turbina e com outros parâmetros (já disponíveis no sistema supervisor do hidrogerador), que possam influenciar na análise de sua condição.

Assim, este sistema terá impacto na redução de paradas não-programadas em unidades hidrogeradoras implicando a

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL, no projeto PD 0673-0001/2009.

J. G. B. da Silva, L. E. L. de Oliveira, E. L. Bonaldi, G. Lambert-Torres e L. E. Borges da Silva são pesquisadores da PS Soluções (e-mails: {levy, erik, jonas, germano, leborges}@pssolucoes.com.br).

M. Curtinhas da Silva e F. Micerino trabalham na EDP Lajeado Energia S/A (e-mail: marcelo.silva@investco.com.br, fabio.micerino@edpbr.com.br).

F. Faria, L. Marques, J. Mak e A. Barnabé são pesquisadores no CGTI – Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação (e-mails: {ffaria, laurence, josemak, barnabe}@buenomak.com.br).

redução de perdas por lucro cessante, multas por indisponibilidade de fornecimento e os próprios custos associados à manutenção.

II. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Em linhas gerais, o projeto visa à identificação da condição do hidrogerador e dos motores de seus sistemas auxiliares. Foram implantados sistemas de análise de assinatura elétrica nos hidrogeradores e nos motores dos sistemas auxiliares. Ainda nos hidrogeradores, foi implantado um sistema de detecção de intensidade de cavitação com base no monitoramento acústico. O sistema ainda utiliza as informações que estão acessíveis e disponíveis no sistema supervisorio e no sistema de análise de vibração já instalado. Por fim, foi desenvolvida uma metodologia de avaliação das situações de estresse e de alteração da vida útil, através da análise de correlação de parâmetros de estresse, resultantes do processamento de parâmetros operativos, e de parâmetros de desgaste, obtidos do hidrogerador e seus componentes através dos sistemas de monitoramento instalados.

Nas seções seguintes, são apresentadas as técnicas de monitoramento e a metodologia proposta.

III. TÉCNICAS DE MONITORAMENTO

Para que a análise de vida útil do hidrogerador e de seus sistemas auxiliares seja feita a partir da análise dos agentes estressores, é necessário determinar a sua condição de desgaste ou a presença de falhas em estágio incipiente.

Como as paradas programadas para manutenção são efetuadas em períodos que podem chegar a dois anos, foi necessário lançar mão de técnicas de monitoramento preditivo da condição de desgaste do hidrogerador. Tais técnicas são baseadas no monitoramento *on-line* e não-invasivo do hidrogerador, incluindo seus componentes e sistemas auxiliares. As principais técnicas utilizadas no projeto estão descritas a seguir.

A. Análise da Assinatura Elétrica (ESA)

A impossibilidade de se parar as máquinas por um longo período é cada vez mais imperiosa. Sendo assim, novas técnicas de monitoramento da condição vêm sendo empregadas e desenvolvidas. Dentro desse contexto, uma das vertentes desse projeto é o monitoramento remoto de hidrogeradores baseado na análise da assinatura elétrica dos sinais de tensão e corrente adquiridos dessas máquinas.

As técnicas de monitoramento da condição baseadas em assinaturas elétricas podem ser aplicadas desde o gerador e fonte primária até o motor e carga acoplada. Podem estar baseadas em métodos invasivos, como a análise do circuito elétrico (análise estática com a máquina desenergizada, também referenciada como análise *off-line* e, portanto, invasiva), ou em métodos não-invasivos, como Análise da Assinatura Elétrica – ESA (Análise Dinâmica, ou seja, com a máquina em funcionamento, também referenciada como análise *on-line*).

“Electrical Signature Analysis” (ESA) é o termo empregado para a avaliação dos sinais de tensão e corrente de máquinas elétricas. No caso mais comum, os sinais de tensão e

corrente são transformados para o domínio da frequência onde são analisados.

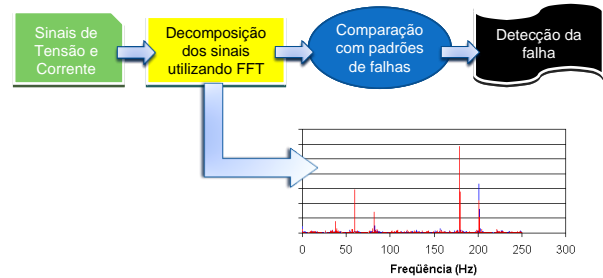


Figura 1. Diagrama em blocos representativo de processo de aplicação de ESA.

O que garante a viabilidade da análise comparativa é que a assinatura de uma máquina em processo de falha é diferente da assinatura de uma máquina em perfeito estado de operação. Padrões de falha podem ser identificados e relacionados com partes do conjunto rotativo em função de seus dados construtivos [1].

Essa técnica pode ser aplicada em motores e geradores, sendo importante se observar que a assinatura de tensão (Voltage Signature Analysis – VSA) está relacionada a uma análise “upstream” do circuito sob monitoramento, ou seja, em direção ao gerador; já a assinatura de corrente está relacionada a uma análise “downstream” do circuito sob monitoramento, ou seja, em direção à carga.

Uma boa revisão das técnicas de ESA para aplicação em motores de indução trifásicos pode ser encontrada em [3].

Análise da Assinatura de Corrente e Tensão

CSA ou VSA são técnicas usadas para analisar e acompanhar a tendência de sistemas energizados dinâmicos. A análise apropriada dos resultados da aplicação da técnica auxiliará a preditiva da planta na identificação de problemas no enrolamento do estator, problemas rotóricos, problemas no acoplamento, problemas na carga acoplada, eficiência e carregamento do sistema, etc.

O sinal de corrente ou tensão de uma das fases da máquina é analisado para produzir o espectro de corrente ou tensão, normalmente referenciado como Assinatura de Corrente ou Assinatura de Tensão respectivamente.

O objetivo é obter tal assinatura para se identificar a magnitude e frequência de cada componente individual que constitui o sinal de corrente ou tensão da máquina. Isso permite que padrões na assinatura da corrente ou tensão sejam identificados para diferenciar máquinas “saudáveis” de máquinas em falta e ainda detectar em que parte da máquina a falha deve ocorrer.

A transformada rápida de Fourier é a principal ferramenta empregada, contudo alguns sistemas empregam em conjunto outras técnicas para aumentar a capacidade de detecção de falhas desde a aquisição do sinal, passando pelo processamento, até a etapa de diagnóstico.

Abordagem por Vetor de Park Estendido (EPVA)

EPVA é uma técnica bastante útil na análise do desequilíbrio elétrico estatórico. Pode ser utilizada também na análise da assinatura de tensão ou corrente no espectro demodulado.

As primeiras pesquisas envolvendo o uso do método do vetor de Park para o diagnóstico de avarias em motores tais como curto-circuito entre espiras, excentricidade do airgap, barras quebradas, etc. datam de 1997 e foram desenvolvidas pelo Professor Cardoso da Universidade de Coimbra, demonstrando-se eficientes [2].

No primeiro momento, a proposta de detecção de avarias se baseava apenas nas distorções sofridas pelo círculo de Park em função do surgimento e do agravamento das avarias [2]. Mais recentemente, a técnica foi aprimorada [4]-[5], podendo ser descrita da seguinte forma:

As correntes das três fases de alimentação de um motor podem ser descritas por:

$$i_A = i_M \cos(\omega t - \alpha) \quad (1)$$

$$i_B = i_M \cos\left(\omega t - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2)$$

$$i_C = i_M \cos\left(\omega t - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3)$$

Onde:

i_M é a o valor de pico da corrente de alimentação;

ω é a frequência angular em rad/s;

α é o angulo de fase inicial em rad;

t é a variável tempo;

i_A, i_B, i_C são respectivamente as correntes nas fases A, B e C.

Já as componentes de corrente do vetor de Park são dadas por:

$$i_D = \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right)i_A - \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)i_B - \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right)i_C \quad (4)$$

$$i_Q = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)i_B - \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)i_C \quad (5)$$

Em condições ideais tem-se:

$$i_D = \left(\frac{\sqrt{6}}{2}\right)i_M \cos(\omega t - \alpha) \quad (6)$$

$$i_Q = \left(\frac{\sqrt{6}}{2}\right)i_M \text{sen}(\omega t - \alpha) \quad (7)$$

Sob condições anormais de operação, ou seja, quando do surgimento de avarias de origens mecânicas ou elétricas, o círculo de Park passa a sofrer distorções. Como essas alterações no círculo de Park são difíceis de serem mensuradas, foi proposta pelo método de EPVA a observação do espectro do módulo do vetor de Park.

A vantagem da técnica de EPVA reside no fato da mesma combinar a simplicidade do método anterior (análise do círculo de Park) com a potencialidade da análise espectral. Além disso, a componente fundamental da alimentação do motor é automaticamente subtraída do espectro pela transformação de Park, fazendo com que as componentes carac-

terísticas de falha apareçam com destaque. O ponto mais importante é o fato da técnica considerar as três fases de corrente ou tensão, gerando um espectro mais significativa por englobar informações das três fases. Esta característica é extremamente útil em casos onde falha só pode ser detectada se consideradas as três fases.

Considerando que as correntes de um motor, onde existe um desequilíbrio nas tensões de alimentação, podem ser representadas por:

$$i_A = i_d \cos(\omega t - \alpha_d) + i_i \cos(\omega t - \beta_i) \quad (8)$$

$$i_B = i_d \cos\left(\omega t - \alpha_d - \frac{2\pi}{3}\right) + i_i \cos\left(\omega t - \beta_i + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (9)$$

$$i_C = i_d \cos\left(\omega t - \alpha_d + \frac{2\pi}{3}\right) + i_i \cos\left(\omega t - \beta_i - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (10)$$

Onde:

i_d é o máximo valor da corrente de seqüência direta;

i_i é o máximo valor da corrente de seqüência inversa;

α_d é o ângulo de fase inicial da corrente de seqüência direta em rad;

β_i é o ângulo de fase inicial da corrente de seqüência inversa em rad.

No vetor de Park:

$$i_D = \left(\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}\right)(i_d \cos(\omega t - \alpha_d) + i_i \cos(\omega t - \beta_i)) \quad (11)$$

$$i_Q = \left(\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}\right)(i_d \text{sen}(\omega t - \alpha_d) - i_i \text{sen}(\omega t - \beta_i)) \quad (12)$$

E o quadrado do módulo do vetor de Park será dado por:

$$|i_D + ji_Q|^2 = \left(\frac{3}{2}\right)(i_d^2 + i_i^2) + 3i_d i_i \cos(2\omega t - \alpha_d - \beta_i) \quad (13)$$

Agora, basta aplicar a FFT ao quadrado do módulo do vetor de Park e observar que o mesmo será composto de um nível DC mais um termo adicional localizado em duas vezes a frequência de alimentação. É exatamente este termo adicional que indicará o surgimento e o agravamento de assimetrias elétricas estatísticas.

B. Análise de Vibração

Mais antiga e difundida no meio industrial, esta técnica requer conhecimento das características do sistema em teste e é utilizada na identificação da presença e severidade de falhas de origem mecânica em todo o conjunto hidrogerador (gerador, mancais e turbina).

A vibração é a resposta às forças dinâmicas que atuam na máquina, que por sua vez, vibra em várias frequências que se propagam por toda a máquina. Estas frequências podem ser identificadas e, na maioria das vezes, relacionadas a um tipo de falha.

Toda máquina apresenta ruído e vibração devido à própria operação e excitações externas, contudo, uma parcela das

vibrações se deve a pequenos defeitos que comprometem o desempenho do equipamento. O aumento do nível de vibração é reflexo do agravamento do defeito.

Efetuar a medição de vibração é uma tarefa que requer uma sistemática de medição e análise bem definida. Alguns dos principais pontos são:

- **Escolha dos pontos de medição:** o analista deve considerar o que deseja medir e qual é a melhor posição para detectá-la, considerando o caminho das ondas mecânicas da sua fonte até o sensor. Além disso, os pontos de medição devem ser marcados nas máquinas para permitir comparação entre as sucessivas medições, pois pontos diferentes de medição podem ter vibrações com características diferentes;

- **Escolha do sinal a ser medido:** o movimento vibratório pode ser expresso na forma de deslocamento, velocidade ou aceleração. Evidentemente, cada um desses parâmetros tem sua utilidade dentro da análise vibracional. Por exemplo, utiliza a medida de deslocamento quando o interesse é por falhas de componentes de frequência mais baixas e a aceleração quando o interesse é nas componentes de frequências mais altas. Já a medida de velocidade é considerada o equilíbrio entre elas.

- **Escolha do parâmetro a ser medido:** dependendo da falha a ser monitorada, o analista deve determinar não só o sinal a ser utilizado (deslocamento, velocidade ou aceleração), mas também o parâmetro a ser extraído do sinal. No caso, existem diversas técnicas e métodos de extração de parâmetros, que envolvem análise temporal ou espectral. Alguns exemplos de parâmetro no tempo são: nível global, fator de crista, valor pico-a-pico. Já no caso de análise espectral, considera-se a amplitude de certa característica de interesse em uma frequência determinada.

- **Escolha dos níveis de referência para alarmes:** por ser uma das técnicas antigas e mais aplicadas na indústria, o analista dispõe de vários valores de referência de vibração, as chamadas cartas de severidade. Apesar da escolha dos níveis de referência ser uma tarefa a ser analisada caso a caso, as cartas de severidade disponíveis podem ser aplicadas em diversas situações com pouco ou nenhuma adaptação à máquina ou processo monitorado.

- **Instrumentação:** são encontrados no mercado diversos tipos de instrumentos para a aquisição e análise do sinal de vibração. As opções vão de aparelhos extremamente simples a sistemas computadorizados com várias ferramentas de análise.

É importante ressaltar que a análise do espectro de frequências do sinal de vibração é a principal técnica de detecção de falhas usando análise de vibração, principalmente após o aumento da sofisticação das técnicas e da instrumentação para análise espectral. A análise espectral não identifica apenas a condição geral da máquina, mas também tem como objetivo apontar problemas específicos, sendo necessário investigar certas componentes de frequência, ou, até mesmo, certos grupos de frequência.

Por outro lado, a análise de parâmetros gerais como nível global ou fator de crista, não dá um diagnóstico detalhado, mas indica a saúde geral da máquina. Uma estratégia de monitoramento muito utilizada é a utilização do nível global como um primeiro diagnóstico e depois a análise espectral

para se identificar a localização da falha em desenvolvimento.

C. Monitoramento Acústico de Cavitação

Cavitação é definida como a formação de bolhas (nas pás da turbina) preenchidas com vapor ou gás em um líquido. Na figura a seguir é possível observar o efeito provocado pelo fenômeno em uma pá de turbina Kaplan:



Figura 2. Cavitação na pá de uma turbina Kaplan.

O processo de cavitação pode causar uma erosão acelerada nas partes expostas de uma turbina, exigindo uma dedicação maior à manutenção. Tal processo implica em uma redução na produção de energia. O dano causado pelas cavidades se implodindo está normalmente associado com uma nuvem de cavitação. Este tipo de cavitação, no qual as bolhas se chocam sob interação coletiva, podendo gerar ondas de choque dotadas de amplitudes elevadas de pressão, é classificado como um dos processos mais danosos [9].

O fenômeno da cavitação ocorre quando a pressão em qualquer ponto do fluxo da água cai abaixo da pressão de vapor da água. Ela é diretamente afetada pela elevação da turbina em referência ao conduto forçado e o tubo de sucção e a velocidade da água. Quando a cavitação se torna importante, as cavidades se espalham sobre uma ampla área do conjunto de palhetas de distribuição, pás ou propulsores. Tal processo pode conduzir à instabilidade da máquina, vibração, desbalanceamento e ruído.

O desenho do rotor exerce uma nítida influência sobre o fenômeno da cavitação. Outros dois parâmetros relevantes também contribuem para a ocorrência, que são o nível de configuração da máquina e as condições de operação distintas de projeto.

A referência [8] afirma que, no caso de turbinas Kaplan, a entrada do rotor pode ser considerada bastante suscetível à ocorrência do fenômeno. Em seções das máquinas dotadas de uma alta velocidade da água, a cavitação pode também se elevar.

De acordo com [7], os métodos de detecção de cavitação em máquinas são baseados na medição e na análise de sinais induzidos, que não se constitui como uma tarefa fácil. Há diversas variáveis intervenientes no processo, como o desenho da turbina e as condições de operação, o tipo de cavitação, seu comportamento e localização. Estes fatores tendem a influenciar a natureza da excitação e são determinantes na

trajetória da transmissão dos sinais ao sensor. Diante destas circunstâncias, a escolha do sensor e seu posicionamento são fundamentais para proceder a uma análise adequada.

Com a finalidade de avaliar vibrações, os locais tradicionais são o mancal, a haste de lâminas diretrizes e a parede externa do tubo de sucção. Para medidas de pressão, os locais possíveis são a parede interna do tubo de sucção e as paredes da caixa espiral. Ademais, as medições, como já destacado, devem ser realizadas em diferentes condições de operação e a aquisição de sinais deve ser realizada com uma elevada taxa de amostragem. A figura 3 apresenta um esquema de uma turbina Kaplan indicando os pontos mais comuns de localização dos transdutores.

Dentre as técnicas de detecção de cavitação, [7] discorre sobre as mais usuais, a saber:

- **Ruído da estrutura e ruído gerado pelo fluido:** são consideradas relevantes as medidas e as análises de ruído hidráulico, com o propósito de investigar o fenômeno da cavitação. O ruído provocado pela estrutura da turbina pode ser facilmente medido.
- **Conteúdo em alta frequência:** os estudos de vibração, de níveis de pressão dinâmica e de emissão acústica, na faixa das altas frequências, são procedimentos bem consolidados para o diagnóstico de cavitação. A aplicação de sensores acústicos tem a finalidade de estender a análise para frequências mais elevadas, região que os acelerômetros não alcançam.
- **Demodulação em amplitude:** frequências hidrodinâmicas bem distintas que governam a dinâmica das cavidades podem ser empregadas na identificação da cavitação.
- **Conteúdo em baixas frequências:** vórtices da cavitação e cavidades com uma importante flutuação de volume provocam perturbações no fluxo principal e resultam em pulsações de pressões fortes no interior do sistema hidráulico. Portanto, nesta situação o procedimento se detém a analisar o conteúdo em frequência dos sinais de vibração e de pressão dentro da faixa de baixas frequências.

Na referência [6], são explorados aspectos do processamento e da interpretação de sinais vibro-acústicos de turbinas em processos de cavitação. É realizada uma série de experimentos com protótipos e modelos. Pontos fracos e melhorias nos experimentos são propostos e exemplos de aplicação são identificados.

IV. METODOLOGIA DE ANÁLISE

A metodologia de análise do impacto de agentes estressores na vida útil de hidrogeradores pode ser definida, de forma geral, pela análise das relações entre os parâmetros relativos à operação da máquina e os parâmetros de desgastes, oriundos de diferentes sistemas de monitoramento preditivo.

Inicialmente, os parâmetros operativos do hidrogerador são utilizados para se identificar os parâmetros de estresse (agentes estressores). Em seguida as relações entre os agentes estressores e os parâmetros de desgaste são analisadas segundo sua correlação e utilizadas como base para se determinar quais agentes estressores afetam a vida útil das unidades geradoras da usina.

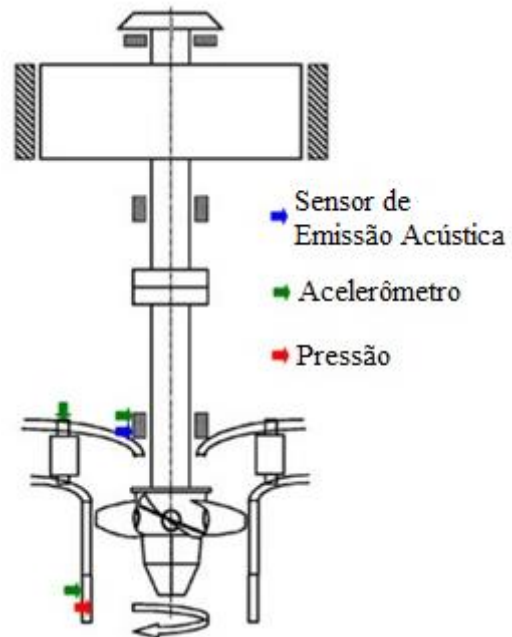


Figura 3. Esquema dos possíveis pontos de instalação dos sensores em turbina Kaplan vertical.

As subseções a seguir descrevem em detalhe cada etapa do processo de obtenção e análise dos agentes estressores, seguindo a metodologia de análise proposta.

A. Integração dos Sistemas de Monitoramento

Com visto anteriormente, a metodologia proposta necessita de diversos tipos de parâmetros do conjunto hidrogerador e seus sistemas auxiliares. Para isso, diferentes sistemas de monitoramento tiveram que ser integrados de forma que as análises pudessem ser feitas em apenas um contexto. Nessa integração, foram considerados não só os parâmetros de monitoramento e controle da operação do hidrogerador, mas também parâmetros relacionados à sua condição de desgaste, medidos utilizando diferentes técnicas e métodos.

Como resultado, tem-se um sistema integrado de avaliação de perda de vida útil de componentes de hidrogeradores devido a agentes estressores e alterações de regime operacional. A figura 4 apresenta uma visão geral do sistema de análise, que se utiliza de parâmetros dos seguintes sistemas de monitoramento:

- **Sistema de Análise da Assinatura Elétrica:** São monitoradas as assinaturas de corrente e tensão do gerador e dos motores dos sistemas auxiliares e são obtidos parâmetros operativos como corrente e tensão RMS, THD, potências (ativa, reativa, aparente, etc.), bem como parâmetros de desgaste, extraídos das assinaturas espectrais da corrente e tensão, como assimetrias elétricas estatísticas, excentricidade e condição rotórica.
- **Sistema Monitoramento Acústico de Cavitação:** baseado no processamento de sinais acústicos de alta frequência (ultrassom) e obtidos através de um dispositivo dedicado de alta performance e precisão. O sistema extrai parâmetros que se correlacionam com a intensidade de cavitação na turbina.
- **Sistema de Análise de Vibrações:** consiste em diversos sensores instalados em diferentes posições do hidrogerador,

oferecendo monitoramento e análise automática da condição mecânica do gerador, especialmente de seus mancais.

- **Supervisório da Usina:** consiste no acesso aos parâmetros gerais de operação e controle das unidades geradoras e que estão disponíveis através do supervisório da usina. Tais parâmetros incluem: potências (ativa, reativa e aparente), velocidade rotórica, frequência, corrente e tensão RMS, temperaturas de diversos componentes do hidrogerador, níveis a montante e a jusante, vazão na turbina, etc..

- **Dados Observacionais:** constituem os dados obtidos pelos operadores e pelo pessoal da manutenção, e que geralmente estão disponíveis através de planilhas ou cartas de controle. Um exemplo deste tipo de parâmetro é a quantidade de material utilizado para reparo na turbina devido à cavitação, na manutenção programada da turbina.

A integração destes sistemas é feita de forma que os parâmetros de interesse sejam agregados em forma de séries temporais, ou seja, os níveis dos parâmetros são importados juntamente com a informação de data e hora da medida. No momento da análise, tais séries são consideradas como curvas de tendência que podem ser comparadas lado a lado.

B. Definição dos Parâmetros de Monitoramento

Uma vez que todos os dados de monitoramentos estão disponíveis, eles são classificados em três tipos. Esta divisão constitui o cerne da metodologia proposta:

- Parâmetros da condição operacional transitória;
- Parâmetros de estresse (agentes estressores);

- Parâmetros da condição de desgaste.

Os parâmetros da condição operacional transitória englobam todos os parâmetros relacionados à condição de operação do hidrogerador e seus componentes em um determinado momento. Estes parâmetros são indicativos do estresse a que o hidrogerador e seus componentes estão submetidos e serão utilizados como base para a obtenção dos parâmetros de estresse. Como exemplos deste tipo de parâmetro, podem-se citar:

- Potência de operação;
- Corrente de operação;
- Intensidade de cavitação.

Em virtude de sua natureza, estes parâmetros precisam ser acumulados no tempo para que se tenha, ao final de um período, um indicativo do total de estresse a que o hidrogerador e seus componentes foram submetidos. Através desta função de acumulação e de outras funções como derivação, seleção ou contagem, diversos parâmetros referentes a agentes estressores podem ser obtidos. São exemplos deste tipo de parâmetro:

- Potência acumulada;
- Potência acumulada fora dos limites de projeto;
- Módulo da derivada da potência (detecção das variações de carga);
- Módulo da derivada da corrente (detecção das variações de carga);
- Número de partidas.

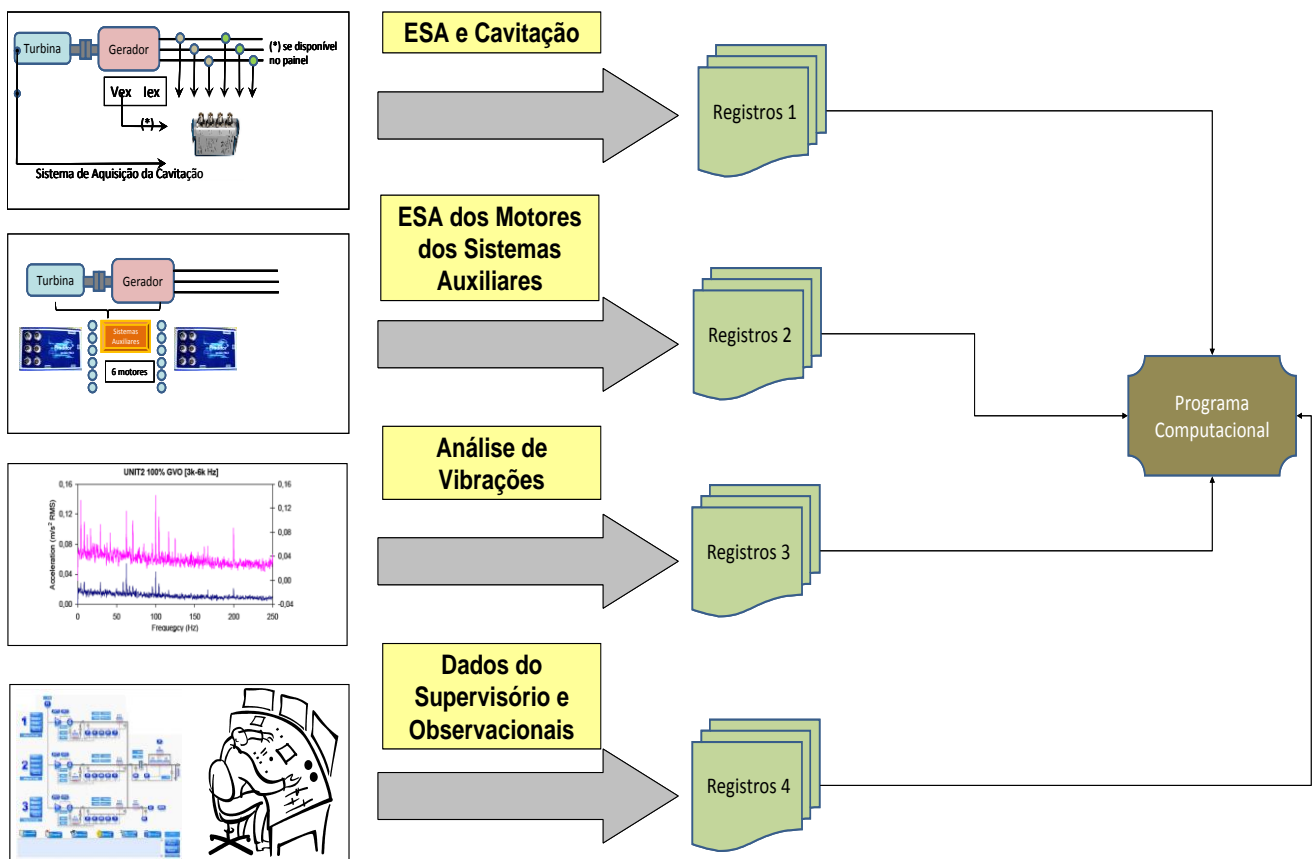


Figura 4. Visão geral do sistema de monitoramento integrando as informações de diferentes sistemas

No caso dos parâmetros acumulados, espera-se que a curva destes parâmetros para a unidade geradora, que se considera mais estressada, seja mais inclinada e apresente um valor final maior que a da unidade geradora, que se considera que opera em melhores condições.

Conforme visto na seção anterior, os parâmetros relacionados à potência e à corrente de operação são acessados pelo Sistema de Análise da Assinatura Elétrica dos hidrogeradores e/ou pelo Sistema Supervisório da usina, de acordo com a conveniência e intervalos de registro mais adequados. Por sua vez, a intensidade de cavitação é registrada pelo Sistema de Detecção de Cavitação, baseado na medição dos sinais de ultrassom.

Já os parâmetros da condição de desgaste englobam todos os parâmetros relacionados à condição de “saúde” do hidrogerador e seus componentes em um determinado momento. Estes parâmetros são indicativos do desgaste acumulado pelo hidrogerador e seus componentes em função do estresse a que foram submetidos.

Em virtude de sua natureza, estes parâmetros não precisam ser acumulados no tempo, pois já possuem intrinsecamente uma característica de acumulação. Desta forma, espera-se que a unidade geradora, que se considera mais desgastada, apresente uma curva mais inclinada, bem como um valor final maior que a da unidade geradora, que se considera em melhores condições. Como exemplos deste tipo de parâmetro, podem-se citar:

- Parâmetros da assinatura elétrica do hidrogerador e dos motores de sistemas auxiliares relacionados a problemas estatísticos, rotóricos, da transmissão e da carga;
- Parâmetros da assinatura vibracional dos hidrogeradores (principalmente os mancais) e dos motores de sistemas auxiliares (relacionados a problemas estatísticos, rotóricos, da transmissão e da carga);
- Erosão sofrida pela turbina;
- Temperatura do componente.

Os parâmetros relacionados à assinatura elétrica são acessados pelo Sistema de Análise da Assinatura Elétrica dos hidrogeradores e sistemas auxiliares. Os parâmetros relacionados à assinatura vibracional são obtidos do Sistema de Análise de Vibrações. A erosão sofrida pela turbina poderá ser levantada nas paradas periódicas de manutenção e inserida manualmente no sistema.

C. A Obtenção dos Agentes Estressores

Conforme visto no item anterior, os parâmetros da condição operacional transitória não oferecem uma forma direta de se monitorar os chamados agentes estressores a que a unidade geradora esta submetida. Para isso, a metodologia de análise proposta utiliza-se de um processamento, através de diferentes funções, dos parâmetros de operação da unidade geradora para se obter um indicador indireto destes agentes. As principais funções utilizadas são:

- **Varição Absoluta:** baseada no operador derivativo, esta função de pós-processamento é capaz de destacar variações (leves ou bruscas) em parâmetros operativos, e que podem ser associadas a grande estresse a que a unidade geradora foi

submetida;

- **Acumulação:** baseada no operador de integração, esta função acumula o parâmetro sendo monitorado, levando em consideração a unidade de tempo. Com isso, é capaz de gerar um indicador numérico sempre crescente que carrega todo o acumulado de um determinado parâmetro. Assim, é possível quantificar o estresse da unidade geradora, em determinado período, em função da intensidade absoluta de um parâmetro monitorado.

- **Seleção:** esta função permite que somente parte das amostras seja considerada no processamento, tendo em vista limites e parâmetros definidos pelo usuário.

- **Contagem:** permite que um determinado evento seja contado, dados certos parâmetros. Um exemplo da aplicação desta função é a obtenção do número de partidas com base nas curvas de velocidade rotórica;

Estas funções também podem ser aplicadas em conjunto. Um exemplo muito utilizado é a “**Varição Acumulada**”, que é obtida a partir dos operadores de variação e acumulação, sendo capaz de destacar um número associado à quantidade de variação à que o parâmetro em análise foi submetido. Desta função, espera-se quantificar o estresse da unidade geradora, em determinado período, em função da intensidade de variação de um parâmetro monitorado.

D. A Correlação entre Parâmetros de Estresse e Parâmetros da Condição de Desgaste

Uma vez que se tenham as curvas de tendências de parâmetros de desgaste e os parâmetros de estresse acumulado (obtidos através dos parâmetros da condição operacional transitória), é realizada a análise da relação entre eles.

Para a avaliação da relação entre estes parâmetros, utiliza-se o índice de correlação, também chamado de “coeficiente de correlação”. Este operador estatístico é uma ferramenta capaz de medir o grau da correlação (e inclusive a direção) entre duas variáveis de escala. Este índice assume valores entre -1 e 1, sendo que a sua interpretação geralmente se dá da seguinte forma (positivo ou negativo):

- 0,70 ou mais, indica uma forte correlação;
- 0,30 a 0,70 indica uma correlação moderada;
- 0 a 0,30 indica uma fraca correlação.

A vantagem de se utilizar este índice como referência para a relação entre parâmetros é a de que ele é obtido automaticamente, independente do usuário, agregando significância estatística ao processo de identificação e avaliação dos agentes estressores.

Pode-se definir a equação de cálculo da correlação entre duas grandezas pela seguinte equação:

$$\rho_{X,Y} = \frac{cov(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{1}{n-1} \sum \frac{(X-\bar{X})(Y-\bar{Y})}{\sigma_X \sigma_Y}, \quad (14)$$

Onde o cálculo do desvio padrão é dado por $\sigma_a = \sqrt{\sum (a - \bar{a})^2}$, $\rho_{X,Y}$ é o índice de correlação entre as variáveis X e Y , $cov(X,Y)$ é a covariância entre as variáveis X e Y , n é o número de amostras, σ_a é o desvio padrão da variável a .

E. Análise dos Resultados

Por fim, a análise da perda de vida útil de componentes de hidrogeradores é efetuada através da identificação de alta correlação entre parâmetros de estresse e parâmetros da condição de desgaste. Nestes casos, considerando uma determinada unidade geradora, o valor da correlação indica quantitativamente o quanto determinado agente estressor influencia no desgaste da máquina.

Portanto, alguns cenários são possíveis após a formação das curvas de tendência dos parâmetros de estresse acumulado e dos parâmetros de desgaste:

1. Há uma correlação positiva entre um parâmetro de estresse acumulado e um parâmetro de desgaste;
2. Há uma correlação próxima de zero entre um parâmetro de estresse acumulado e um parâmetro de desgaste;
3. Há uma correlação negativa entre um parâmetro de estresse acumulado e um parâmetro de desgaste.

A ocorrência dos cenários 2 e 3 pode indicar a impropriedade dos parâmetros de desgaste selecionados, uma vez que eles não se sensibilizam pelo estresse acumulado da maneira correta. Se este fato for comprovado, o monitoramento de cada um destes parâmetros pode ser descartado.

De forma geral, espera-se que haja uma correlação positiva entre estes os parâmetros de desgaste e os parâmetros de estresse acumulados de uma mesma unidade geradora. Assim, o acumulado dos parâmetros de estresse irá indicar aquele que sofreu mais estresse, enquanto as curvas dos parâmetros da condição de desgaste irão indicar aquele que está mais desgastado. Uma vez que essas relações forem identificadas e quantificadas, será possível avaliar a alteração da vida útil das unidades geradoras em decorrência desses agentes estressores.

V. VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA

No contexto deste projeto, a validação da metodologia requer não só uma aquisição maciça de dados, efetuado em diferentes unidades geradoras, mas também amostras de dados representativos do hidrogerador em condições normais e de desgaste significativo. Sem casos reais de desgaste, a validação dos parâmetros de estresse é limitada.

Nesse sentido, a estratégia utilizada para a validação está baseada no monitoramento ao longo do tempo de dois conjuntos hidrogeradores irmãos, situados em uma mesma usina, e que estão submetidos a intensidades de estresse diferentes. Com isso, ao longo de um ciclo de manutenção, será possível avaliar o real desgaste dessas unidades, e validar quais os agentes estressores monitorados impactaram no desgaste das unidades geradoras monitoradas.

Considerando a metodologia proposta, a qualidade dos resultados depende de três fatores principais:

- **Processo de Amostragem:** na obtenção dos agentes estressores, a consistência na amostragem dos parâmetros de operação, evitando períodos sem leitura, é imprescindível para se obter bons resultados. Além disso, considerando os diferentes sistemas, nem sempre as amostras são compatíveis, o que interfere na obtenção do índice de correlação,

visto que quanto mais pontos obtidos de forma direta (e não por interpolação), maior será a significância estatística do valor calculado.

- **Confiabilidade dos Parâmetros de Desgaste:** considerando que o objetivo da análise dos agentes estressores é a análise da sua relação com a vida útil da unidade geradora, a utilização de parâmetros de desgaste confiáveis é de extrema importância. Tais parâmetros devem ser sensíveis às mudanças na condição de desgaste das diferentes partes da unidade geradora.

- **Formação de Histórico:** mesmo que o processo de amostragem seja consistente e que os parâmetros de desgaste sendo monitorados sejam confiáveis, é importante notar que as relações reais entre os agentes estressores e parâmetros de desgaste se dará considerando períodos de tempo longos. Isto se deve ao fato do desgaste de nas unidades geradoras ser gradativo e lento, sendo a sua detecção possível em estágios relativamente avançados.

O estágio atual de validação da metodologia se encontra na formação de histórico. Ao longo do projeto foram estabelecidos os parâmetros a serem monitorados, a forma de cálculo dos parâmetros de estresse, e o processo de amostragem dos mesmos.

Conforme ilustra a figura 5, a pesquisa desenvolvida neste projeto já dispõe dos parâmetros de interesse para duas unidades geradoras, UG1 e UG5, cuja operação e estresse a que estão submetidas é diferente. Na figura, é possível notar, através do valor final, que o acumulado de potência (e acumulado de variação de potência) é diferente entre elas, mas o impacto dessa diferença ainda não é visível nos parâmetros de desgaste selecionados, visto que os mesmos não apresentaram aumento no período.

Por fim, outro ponto importante para validação da metodologia está relacionado à cavitação na turbina. Após algumas medições da erosão (a ser feita nas paradas programadas das unidades), será possível correlacionar a erosão sofrida pela turbina com os parâmetros levantados da assinatura de ultrassom, de modo a se obter um estimador e, em um segundo momento, verificar a sua funcionalidade.

VI. CONCLUSÕES

Com o objetivo de se identificar o impacto de agentes estressores no desgaste de hidrogeradores, foi proposta uma metodologia baseada na medição parâmetros de estresse e de desgaste, de forma que a correlação entre tais parâmetros indica a influência de um determinado agente estressor na vida útil da máquina e seus componentes.

A obtenção dos parâmetros de estresse é efetuada através do processamento de parâmetro operativos do hidrogerador, enquanto que os parâmetros de desgaste são oriundos de sistemas de monitoramento preditivo, baseados em diferentes técnicas de análise. As técnicas utilizadas são: análise da assinatura elétrica do gerador e motores dos sistemas auxiliares, análise de vibração dos mancais e monitoramento da intensidade de cavitação através de ultrassom.

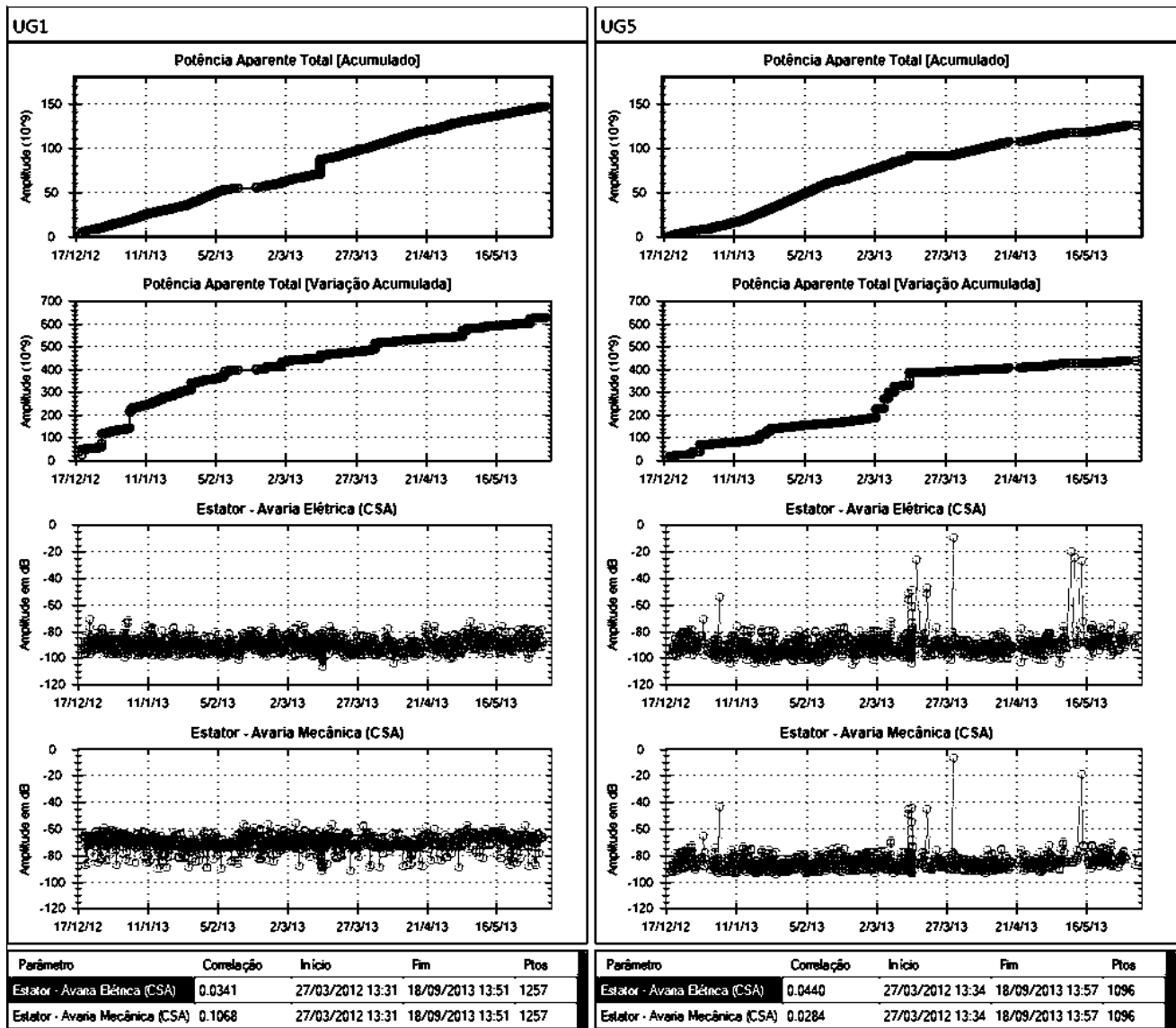


Figura 5. Comparação de curvas de tendência de parâmetros de estresse (Potência Aparente Acumulada e Variação Acumulada de Potência Aparente) e parâmetros de desgaste elétrico e mecânico do estator do gerador das unidades geradoras UG1 e UG5.

Os diferentes sistemas foram integrados de forma a se obter uma ferramenta capaz de efetuar o processamento e a análise destes parâmetros. Através do índice de correlação, os parâmetros de estresse acumulado são quantificados segundo sua relação com um determinado parâmetro de desgaste.

Por fim, o sistema desenvolvido para a análise de agentes estressores está operacional e o processo de validação da metodologia encontra-se em estágio de formação de histórico, visto que os parâmetros de desgaste ainda não apresentaram alteração dentro do período do projeto.

VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. L. Bonaldi, "Diagnóstico Preditivo de Avarias em Motores de Indução Trifásicos com MCSA e Teoria de Conjuntos Aproximados", Tese de Doutorado, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, 2006.
- [2] A. J. M. Cardoso, *Diagnóstico de Avarias em Motores de Indução Trifásicos*, Coimbra: Coimbra Editora, 1991.
- [3] M. H. Benbouzid, "A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection", in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, pp. 984-993, Oct. 2000.
- [4] S. M. A. Cruz e A. J. M. Cardoso, "Diagnosis of the Multiple Induction Motor Faults Using Extended Park's vector Approach", in *International Journal of Comadem*, pp 19-25, 2001.
- [5] S. M. A. Cruz e A. J. M. Cardoso, "Diagnosis of Stator Inter-Turn Short Circuits in DTC Induction Motor Drives", in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, NO. 5. September/October 2004.
- [6] B. Bajic, "Methods for vibro-acoustic diagnostics of turbine cavitation" in *J. of Hydraulic Research*, v. 41, n. 1, p. 87-96, 2003.
- [7] X. Escaler, E. Egusquiza, M. Farhat; F. Avellan e M. Coussirat, "Detection of cavitation in hydraulic turbines", in *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 20, p. 983-1007, 2006.
- [8] T. Flaspöhler, "Design of the runner of a Kaplan turbine for small hydroelectric power plants", Tese de Doutorado, Tampere: University of Applied Sciences, 2007.
- [9] M. Grekula e G. Bark, "Experimental Study of Cavitation in a Kaplan Model Turbine", in *Proceedings of CAV 2001: Fourth International Symposium on Cavitation*, Pasadena, California Institute of Technology, CA. USA, June, 2001. p. 20-23.
- [10] B. Sirok, I. Kern, M. Hocevar e M. Novak, "Monitoring of the Cavitation in the Kaplan Turbine" in *Proceedings of ISIE'99 - Bled*, Slovenia, p. 1224- 1228.