



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GGH/26
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - I

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

MATRIX-UG – UMA EVOLUÇÃO NO MONITORAMENTO DE UNIDADES GERADORAS

**Assis Neto, José Quirilos (*)
ITAIPU BINACIONAL**

RESUMO

O Sistema de Monitoramento MATRIX-UG é um sistema baseado em plataforma de hardware de mercado, atualmente na fase de implantação na Usina Hidrelétrica Itaipu.

O software, baseado no aplicativo SOMA, do CEPEL, é também aberto à incorporação de novas funções, novos modelos de monitoramento, diferentes tipos de visualização, armazenamento histórico e processamento de dados. Será integrado a outros sistemas da planta, entre eles, o SCADA.

Sua principal característica inovadora é o monitoramento baseado em modelos matemáticos ARMAX, que permite a detecção de falhas incipientes com grande antecedência. O artigo mostra o que é e como fazer isso.

PALAVRAS-CHAVE

Monitoramento, Modelamento matemático, Matrix, ARMAX, Itaipu

1.0 - INTRODUÇÃO

A capacidade atual dos sistemas de aquisição de dados, aliada a sensores e transdutores de sinais de alta confiabilidade e exatidão, permitem hoje a obtenção de uma massa de dados de alta qualidade e flexibilidade. Em uma mesma plataforma de hardware, é possível adquirir sinais de temperatura, vibração, pulsação de pressão, entreferro, descargas parciais, entre outros, todos em uma mesma base de tempo, integrados e com períodos de amostragem adequados à aplicação. Estes equipamentos permitem ainda a execução de cálculos complexos sobre esta base de dados, usando também parâmetros operativos, que definem condições de contorno e ajustes automáticos nos algoritmos. Além disso, têm a capacidade de comunicação de dados em alta velocidade, transmitindo dados em grandes volumes para computadores com ainda maior capacidade de processamento, cálculos, armazenamento de dados de longo termo e apresentação de resultados nas mais variadas formas.

O uso de linguagens e ambientes de programação modernos, amigáveis, de alto desempenho e produtividade, com total integração entre os sistemas de aquisição de dados e os servidores de dados centralizados forneceram o complemento necessário para projetarmos um sistema de monitoramento de unidades geradoras com funcionalidades inéditas até então.

O sistema, baseado no aplicativo SOMA, desenvolvido pela Eletrobras Cepel, é denominado Matrix-UG. Está na fase de desenvolvimento das funções avançadas. Entre elas, destacamos a modelagem matemática da maioria das grandezas adquiridas, através dos métodos de modelamento autoregressivos (AR, ARX, ARMAX) e seu exercício online.

Testes de monitoramento já realizados, usando o modelamento das grandezas em uma das unidades geradoras da Central Hidrelétrica de Itaipu, forneceram resultados altamente precisos e aderentes à dinâmica dos sinais de campo. Para o caso da temperatura da sapata do mancal escora, o modelo forneceu valores com precisão melhor que 1 °C durante todo período de 2.500 horas de monitoramento, comparado com o valor real medido em campo. Para a vibração do eixo, os resultados também foram satisfatórios. Neste caso, o modelo foi verificado para três vibrações do eixo distintas (SHUGBX – mancal guia superior, SHCOBX – mancal guia combinado e SHTGBX – mancal guia da turbina), em 10 medições diferentes realizadas ao longo de 12 meses, com potências e quedas

(*) Av. Tancredo Neves, n° 6731 – Usina Hidrelétrica de Itaipu – CEP 85.866-900 Foz do Iguaçu, PR – Brasil
Tel: (+55 45) 3520-3089 – Fax: (+55 45) 3520-3656 – Email: jassis@itaipu.gov.br

O uso de modelos matemáticos exercitados online no monitoramento de máquinas rotativas estabelece um novo método de detecção precoce de defeitos nestes equipamentos. Isto porque o equipamento é efetivamente monitorado em todos os pontos de operação, seja ele em baixa ou alta carga. Neste método, os limites de ação automática do sistema de monitoramento deixam de ser fixos e relacionados com os limites físicos do equipamento. Os novos limites estabelecidos são faixas mais estreitas de valores esperados. Qualquer desvio acima destes limites, para qualquer ponto de operação, dispara uma ação programada no sistema de monitoramento.

Os próximos capítulos apresentam a arquitetura do sistema Matrix, suas principais características, o método para obtenção dos modelos matemáticos dos valores monitorados e os resultados obtidos pelo exercício estes modelos em tempo real.

2.0 - SISTEMA DE MONITORAMENTO MATRIX-UG

O Sistema de Monitoramento das Unidades Geradoras de Itaipu, batizado como MATRIX-UG (acrônimo para Monitoramento de Ativos das Unidades Geradoras de Itaipu) e está em fase final de projeto e início de instalação. É composto por vinte Unidades de Aquisição e Controle – UAC, sendo uma para cada unidade geradora. Cada UAC é interligada a um conjunto de sensores de temperatura e de transdutores de vibração distribuídos para monitorar os seus diversos subsistemas e equipamentos, como enrolamento e núcleo do estator do gerador, turbina, eixos e mancais, sistemas de resfriamento, entre outros. Outro conjunto de sensores e transdutores, em especial de acopladores de descargas parciais do enrolamento estatórico será instalado em locais apropriados. Está prevista também a instalação futura de sensores de entreferro, cujas entradas para aquisição destas grandezas já estão disponíveis na UAC. As UAC são interligadas através de uma rede de fibra-óptica a um centro de monitoramento, denominado CMSD (Centro de Monitoramento e Servidores de Dados). Além desta interligação, a rede de comunicação do sistema é conectada fisicamente à rede SIRI (Sistema Integrado de Redes de Comunicação Industriais), a qual integrada física e logicamente outros sistemas de informação da planta, como o SCADA. A base de tempo do sistema é sincronizada por sinal NTP, oriundo de uma rede de receptores de sinal GPS já existente na planta. A figura 1 abaixo representa a arquitetura básica do sistema MATRIX-UG.

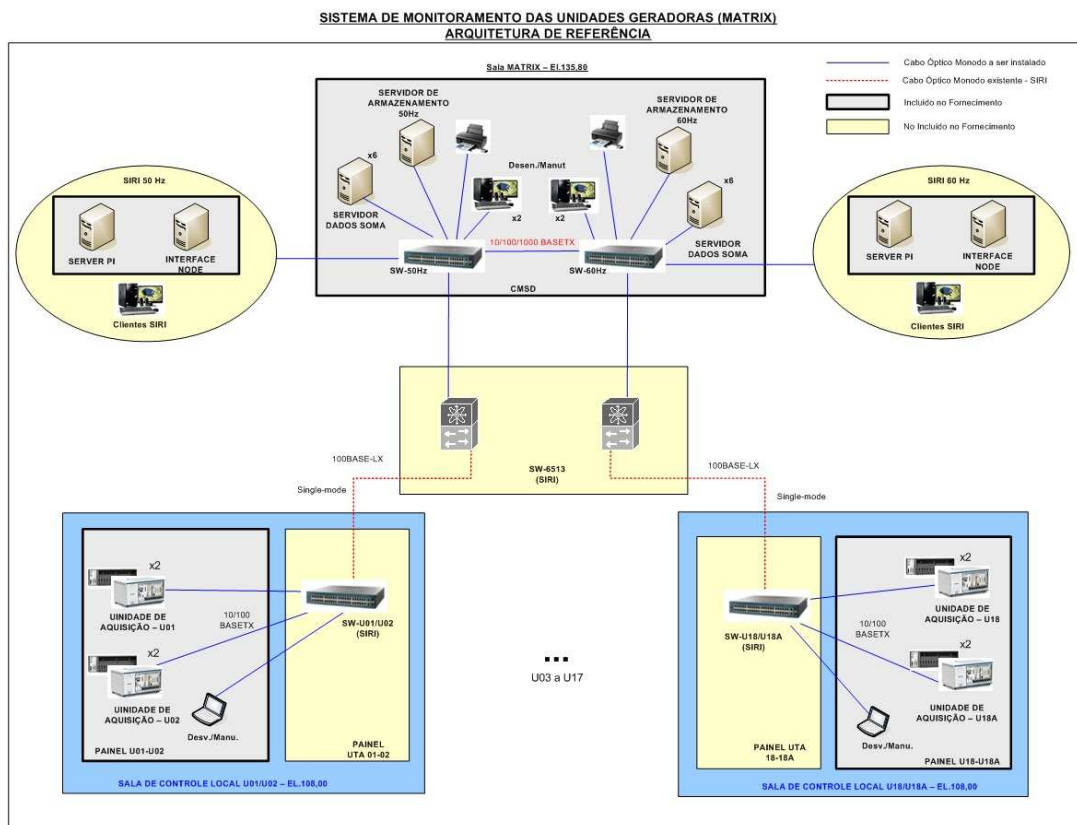


FIGURA 1 – Arquitetura básica do sistema MATRIX-UG

O sistema foi planejado para ser implantado em duas fases. A primeira fase é composta pela seguinte estrutura:

- Instalação completa de todo o hardware do sistema, composto por todas as UAC, equipamentos de comunicação, servidores de dados, servidores de armazenamento e demais periféricos.
- Instalação do programa aplicativo SOMA, do CEPEL, configurado e customizado, com todas as suas funcionalidades de monitoramento atuais, descritas a seguir.

- Integração do sistema com a rede de comunicações e servidores de dados do SIRI, incluindo a integração de dados do SCADA (sistema de controle da usina), para aquisição dos parâmetros operativos das unidades geradoras (potência ativa, tensão, corrente, rotação da unidade, nível do reservatório, etc).

A segunda fase é composta pela integração de novas funcionalidades de monitoramento, entre elas:

- Monitoramento baseado no exercício dos modelos matemáticos
- Novas formas de visualização de dados e informações
- Maior integração com outros sistemas, em especial o SCADA
- Integração de novas tecnologias em desenvolvimento

Ressaltamos que as duas fases de execução do projeto são concorrentes no tempo. O motivo da separação em fases é que na primeira fase não há desenvolvimentos ou pesquisas a serem feitas e na segunda existem. Porém, caso estes desenvolvimentos cumpram o cronograma meta, todas as funcionalidades estarão integradas no início de operação do sistema.

Além do sistema descrito acima, o projeto prevê a implantação de três plataformas de teste. A função destas plataformas, denominadas Gigas de Teste, é permitir o ensaio de cartões da UAC com vistas a sua manutenção antes ou após uma intervenção. Estas plataformas também têm o objetivo de subsidiar o desenvolvimento e pesquisa das novas funcionalidades para o sistema, incluindo as listadas na segunda fase acima referida. Estas Gigas serão destinadas a diferentes laboratórios de desenvolvimento que participam do projeto, sendo eles: Parque Tecnológico de Itaipu – PTI Margem Direita (Paraguai), PTI – Margem Esquerda (Brasil) e Itaipu Binacional.

2.1 Plataforma de Aquisição de Dados

A aquisição de dados do sistema é realizada pela UAC. Este equipamento é formado por uma plataforma padrão PXI, fornecida pela National Instruments. Nesta plataforma, para cada unidade geradora, estão conectados os cartões de entrada e saída de temperatura (400 pontos), vibração e entreferro (32 pontos) e descargas parciais (32 pontos em somente duas unidades geradoras).

Conectado nesta plataforma, existe também um rack do tipo Compact Daq, também de fabricação da National Instruments, para conexão de entradas digitais, entradas analógicas de 4 a 20 mA e saídas digitais. Estes pontos são para uso futuro, principalmente para conexão de parâmetros operativos, no caso eventual da integração prevista através de comunicação digital com o SCADA não se mostre adequada.

2.2 Centro de Monitoramento do MATRIX-UG

O CMSD é responsável pelo armazenamento histórico dos valores, visualização dos dados em diferentes formas, como tendências gráficas, tabelas, telas sinópticas e relatórios formatados, necessários ao monitoramento e diagnóstico das Unidades Geradoras. O software aplicativo do CMSD é baseado no aplicativo SOMA, do CEPEL. O CMSD possui capacidade de comunicação com outros sistemas de informação. A comunicação é através de protocolos de comunicação de dados padrão e aberto, como o IEC-870-5-104, MODBUS/TCP e OPC.

Outro núcleo de processamento, visualização e armazenamento de dados, baseado no sistema de gerenciamento de dados PI, de fabricação da OsiSoft e no pacote de tratamento e visualização de dados SharePoint, da Microsoft, também está disponível no CMSD. Esta plataforma será utilizada como complemento do sistema SOMA, com a responsabilidade de processar e visualizar dados da base de dados geral da planta, onde estão armazenados dados deste e dos outros sistemas de informação integrados à rede SIRI.

3.0 - OBTENÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS

Este capítulo é dedicado a uma introdução simplificada aos modelos matemáticos do tipo ARMAX (do inglês AutoRegressive Moving Average model with eXternal input), mostrando a relação existente entre os parâmetros do modelo e os parâmetros do sistema dinâmico por ele representado.

São apresentados os resultados da aplicação desta família de modelos, em especial dos tipos mais simples, como o modelo auto-regressivo (AR) e o modelo auto-regressivo com entrada externa (ARX), na representação do comportamento dinâmico de grandezas eletromecânicas de máquinas rotativas, para o caso específico de uma unidade geradora de Itaipu (hidrogerador de eixo vertical e turbina Francis).

Os resultados foram satisfatórios nesta representação, tanto para as grandezas de variação lenta, como temperaturas dos mancais, quando para as grandezas de elevada dinamicidade, como as vibrações do eixo. Esta constatação indica a possibilidade de aplicação dos modelos ARMAX no monitoramento de máquinas rotativas, por exemplo, para estimação de valores e detecção de defeitos.

3.1 Modelo Auto-regressivo do Tipo ARX

O primeiro modelo adotado foi o modelo ARX (do inglês AutoRegressive model with eXternal inputs). O modelo ARX de um sistema dinâmico de entrada $x[n]$ e de saída $y[n]$ pode ser descrito matematicamente pela equação 1:

$$A(q) \cdot y[n] = B(q) \cdot x[n] + v[n] \quad \text{Equação 1}$$

na qual $v[n]$ é um ruído colorido aplicado à saída do sistema, q é o operador atraso, e $A(q)$ e $B(q)$ são dados por:

$$A(q) = 1 + a_1 \cdot q^{-1} + a_2 \cdot q^{-2} + \dots + a_{ny} \cdot q^{-ny}$$

$$B(q) = b_1 \cdot q^{-1} + b_2 \cdot q^{-2} + \dots + b_{nx} \cdot q^{-nx} \quad \text{Equação 2}$$

À primeira vista pode parecer que a compreensão do significado físico da Equação 1 requer conhecimentos esotéricos. Contudo, desconsiderando-se o ruído $v[n]$ e fazendo-se $nx = ny = 2$, verifica-se que a aplicação do

operador atraso na Equação 2 (conforme $A(q)$ e $B(q)$) mostrará que o modelo ARX é equivalente à equação de diferenças (EdD) da Equação 1, a qual modela matematicamente os sistemas dinâmicos no domínio do tempo discreto. Portanto, pode-se inferir que os coeficientes a_i e b_i do modelo ARX estão relacionados com os parâmetros do sistema dinâmico modelado, bem como com o período de amostragem. Em outras palavras, o sinal de saída atual ($y(n)$) pode ser descrito pela combinação dos sinais de entrada atual e ($x(n)$) seus valores anteriores ($x(n-1)$ e $x(n-2)$) e ainda os valores anteriores do sinal de saída ($y(n-1)$ e $y(n-2)$), somados a uma constante.

Genericamente, considere um sistema dinâmico cuja saída é conhecida no intervalo $t = 0$ ($y[0]$) a $t = n.T$ ($y[n]$). Provavelmente uma das formas mais simples de estimar-se o valor da próxima medição $y[n+1]$ é tomar a média dos seus antecessores. Obviamente, o valor estimado pela média de todos os antecessores não irá fornecer uma previsão acurada do valor que será medido, basta imaginar-se o que iria ocorrer em um sistema com saída senoidal. Entretanto, a qualidade da previsão pode ser melhorada fazendo-se uma ponderação dos antecessores, atribuindo-se um peso maior àqueles mais recentes. Este processo é conhecido como média móvel (no idioma inglês, moving average). É importante lembrar que os antecessores considerados contêm uma parcela devida ao ruído $v[n]$, com uma dada ponderação.

Considerado o exposto, pode-se definir o modelo ARMAX (do inglês AutoRegressive Moving Average model with eXternal input), no qual são considerados os antecessores da saída e da entrada, bem como os efeitos de um ruído ponderado. Tal modelo pode ser representado pela equação seguinte:

$$A(q) \cdot y[n] = B(q) \cdot x[n] + C(q) \cdot v[n] \quad \text{Equação 3}$$

na qual $C(q) = c_1 \cdot q^{-1} + c_2 \cdot q^{-2} + \dots + c_{n_v} \cdot q^{-n_v}$.

3.2 Modelo Auto-regressivo do tipo AR

Um modelo muito útil na representação de sistemas dinâmicos, em especial pela sua simplicidade, é o modelo auto-regressivo (AR), mostrado na equação seguinte.

$$A(q) \cdot y[n] = 0 \quad \text{Equação 4}$$

A equação anterior é dita autônoma, ou seja, $x[n]=0$ e o valor atual $y[n]$ pode ser calculado através de uma combinação linear dos valores anteriores. Pode parecer estranho que seja possível estimar-se o valor de $y[n]$ sem conhecer-se ou considerar-se a excitação $x[n]$. Mas pode-se interpretar que, de alguma forma, a excitação e os efeitos da dinâmica do sistema estejam embutidas nos antecessores de $y[n]$.

Este informe técnico mostrará exemplos de aplicação dos modelos auto-regressivos tipo AR e ARX, por serem de aplicação mais simples na estimativa (ou previsão) da grandeza monitorada. Entretanto, além destes e do modelo ARMAX existem uma grande variedade de modelos auto-regressivos (e.g. ARMA, ARIMA, NARIMA, NARX, NARMAX, etc.) aplicáveis à representação de sistemas dinâmicos.

3.3 Determinação dos Parâmetros do Modelo Auto-regressivo

Para entender-se o princípio aplicado na determinação dos parâmetros do modelo auto-regressivo, será considerado o caso do mais simples deles, um modelo AR de ordem ny . Para maior clareza, a Equação 4 será escrita na forma recursiva, como segue.

$$y[n] = -a_1 \cdot y[n-1] - a_2 \cdot y[n-2] - \dots - a_{ny} \cdot y[n-ny] \quad \text{Equação 5}$$

Determinar os parâmetros do modelo significa determinar os coeficientes a_1, a_2, \dots, a_{ny} da equação anterior. Se forem conhecidos $2 \cdot ny$ valores de $y[n]$ ($y[1-ny], \dots, y[-1], y[0], y[1], \dots, y[ny]$), podem ser escritas ny relações dadas pela Equação 5, como mostrado na equação matricial seguinte.

A Equação 6 pode ser escrita na forma compacta como $\{y\} = [M] \cdot \{a\}$. Os coeficientes buscados, isto é, o vetor $\{a\}$ pode ser determinado por $\{a\} = [M]^{-1} \cdot \{y\}$. Naturalmente o problema é mais complexo (e.g. a matriz $[M]$ pode ser mal condicionada, pode haver ruído elevado na medição, etc.) e esta solução não pode ser empregada diretamente. A solução é empregar valores obtidos em medições adicionais de $y[n]$, obtendo-se um sistema super-determinado, com subsequente aplicação do Método dos Mínimos Quadrados para determinar os parâmetros do modelo ($\{a\}$).

$$\begin{bmatrix} y[1] \\ y[2] \\ y[3] \\ \vdots \\ y[ny] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y[0] & y[-1] & y[-2] & \cdots & y[1-ny] \\ y[1] & y[0] & y[-1] & \cdots & y[2-ny] \\ y[2] & y[1] & y[0] & \cdots & y[3-ny] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y[ny-1] & y[ny-2] & y[ny-3] & \cdots & y[0] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_{ny} \end{bmatrix} \quad \text{Equação 6}$$

A qualidade de ajuste do modelo é verificada comparando-se os valores medidos com os valores estimados. Diversos critérios de avaliação podem ser utilizados, desde critérios mais simples e intuitivos, como o erro médio absoluto ou o erro quadrático médio, até outros critérios mais sofisticados, como o AIC (Akaike Information Criterion), o HQC (Hannan-Quinn information Criterion) e o BIC (Bayesian Information Criterion).

Na prática o modelo é determinado através do uso de softwares específicos (e.g. Matlab, Statistica, Statgraphics, etc.). Vale ressaltar que mesmo o relativamente simples Excel pode ser utilizado para determinar o modelo AR ou ARX de um sistema dinâmico. Neste trabalho foi utilizado o software científico livre Scilab.

3.4 DETERMINAÇÃO DO TIPO DE MODELO AUTO-REGRESSIVO

3.4.1 Estimativa da grandeza monitorada com modelos auto-regressivos

O propósito do trabalho relatado por este informe técnico é verificar a aplicação de modelos auto-regressivos para estimar, ou mais precisamente, para prever o valor da grandeza monitorada de uma dada máquina rotativa. Caso o valor real medido da grandeza monitorada esteja próximo do valor previsto, o modelo auto-regressivo continua representando bem a máquina rotativa.

A Tabela 1 explicita que os parâmetros do modelo auto-regressivo têm relação direta com os parâmetros do modelo físico do sistema dinâmico monitorado. Assim, assumindo-se que o modelo foi determinado com o sistema dinâmico em boas condições, a concordância entre a previsão e o valor medido indica que ele permanece nesta situação. Por outro lado, discordâncias entre os valores citados acima de tolerâncias estabelecidas adequadamente, indicam que o sistema dinâmico sofreu uma deterioração significativa.

Na seção seguinte será verificada a aplicabilidade de modelos auto-regressivos para representar o comportamento dinâmico de temperaturas dos mancais e de vibrações do eixo de hidrogeradores.

3.5 Uso de Modelos Tipo ARX na Temperatura dos Mancais

3.5.1 Escolha do modelo

A Figura 2 mostra o comportamento da potência ativa do gerador, da temperatura da água de resfriamento e de uma sapata do mancal de escora de um grande hidrogerador, ao longo de um período 2500 horas.

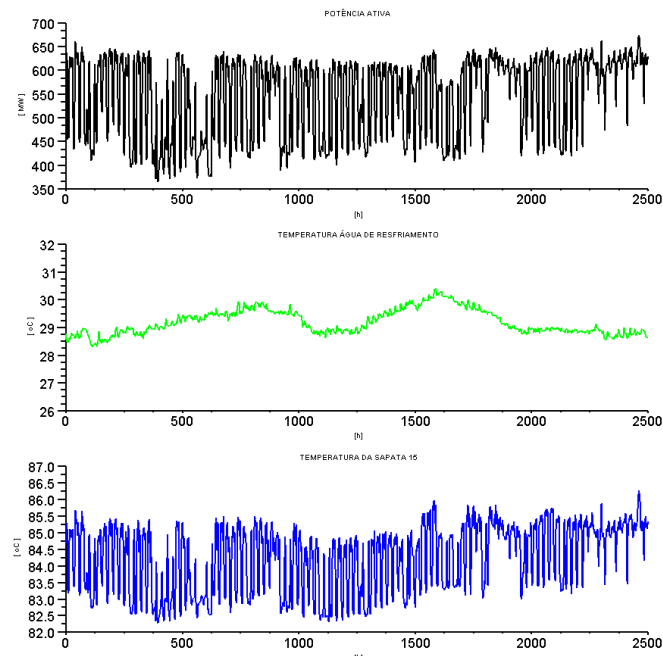


Figura 2 – Potência ativa (preta), temperatura da água de resfriamento (verde) e a temperatura da sapata 15 do mancal de escora (azul)

Uma rápida inspeção na figura revela que a temperatura da sapata depende principalmente da potência ativa do gerador, ou seja, do empuxo hidráulico axial sobre o mancal. Obviamente, depende também da temperatura da água de entrada dos trocadores de calor do mancal. O conhecimento da anatomia da unidade geradora, em especial neste momento, é de fundamental importância.

Com base nesta análise, corroborada pelos elevados fatores de correlação entre as grandezas citadas, decidiu-se testar um modelo ARX tendo como saída $y[n]$ a temperatura da sapata considerada, $x_1[n]$ a potência do gerador e $x_2[n]$ a temperatura da água de resfriamento do mancal. A equação deste modelo é mostrada a seguir.

$$A(q) \cdot y[n] = B_1(q) \cdot x_1[n] + B_2(q) \cdot x_2[n] + v[n]$$

Equação 7

3.5.2 Determinação dos parâmetros do modelo e resultados obtidos

A determinação foi feita com o uso da função 'armax' do software Scilab, adequadamente ajustada para um sistema com duas entradas e uma saída. A primeira décima parte dos sinais de entrada e de saída foi tomada para ajustar um modelo ARX. Para tanto, os sinais foram normalizados para terem média nula e variância unitária. Os parâmetros ou coeficientes de um modelo ARX(2,3) podem ser verificados nas equações seguintes. Os parâmetros desta função têm o seguinte significado: ordem 2 para a parte auto-regressiva e ordem 3 para a

entrada exógena. Os resultados obtidos pelo exercício deste modelo podem ser observados na parte superior da Figura 3, na qual a curva azul representa as temperaturas reais (medidas) e a curva vermelha representa das temperaturas estimadas pelo modelo ARX. Ainda que seja de um ponto de vista meramente qualitativo, verifica-se uma boa coerência entre os valores medidos e estimados.

$$\begin{aligned}
 A(q) &= 1 - 0,78246 \cdot q^{-1} + 0,30696 \cdot q^{-2} \\
 B_1(q) &= 0,69678 - 0,85356 \cdot q^{-1} + 0,08156 \cdot q^{-2} + 0,122420 \cdot q^{-3} \\
 B_2(q) &= 0,01368 - 0,05394 \cdot q^{-1} + 0,10769 \cdot q^{-2} - 0,06466 \cdot q^{-3}
 \end{aligned}
 \tag{Equação 8}$$

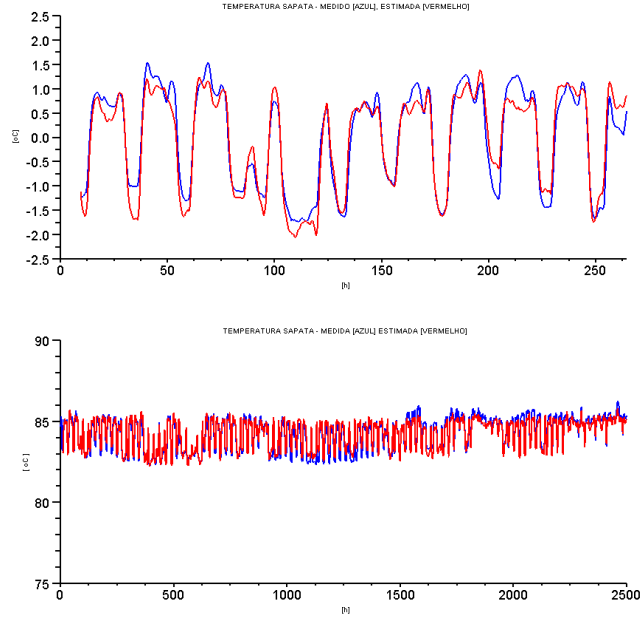


Figura 3 – Resultado do modelo ajustado

De posse do modelo ARX (Equação 8) pode-se verificar se o modelo continua representando bem a realidade ao longo das 2500 horas. O resultado visual desta verificação pode ser visto na parte inferior da Figura 3. Pode-se verificar discrepâncias a partir de 1500 horas, nas quais o valor real é superior ao valor estimado, o que indicaria um aquecimento anormal no mancal. Contudo, as discrepâncias são menores do que 1°C, valor estimado para a classe de exatidão da cadeia de medição de temperatura. Assim, em termos práticos pode-se afirmar que o modelo ARX estima com eficácia a temperatura da sapata do mancal de escora do hidrogerador considerado, para fins de monitoramento.

3.6 Uso de Modelos Tipo AR na Vibração do Eixo

3.6.1 Resultados da aplicação do modelo AR

No caso da vibração do eixo não foi possível identificar-se claramente as excitações, como ocorrido no caso da temperatura do mancal de escora. Assim, decidiu-se testar um modelo AR, tendo como saída $y[n]$ a vibração do eixo. A expressão matemática para este modelo pode ser encontrada na Equação 7 ou na Equação 8.

Utilizando-se novamente a função 'armax' do Scilab, ajustando-se o modelo para a vibração do eixo no plano do mancal guia superior, adquirido ao longo de 25 segundos com uma frequência de amostragem de 600 Hz, encontrou-se os seguintes parâmetros médios para o modelo AR:

$$A(q) = 1 + 0,4488 \cdot q^{-1} + 0,2518 \cdot q^{-2} + 0,4891 \cdot q^{-3} - 0,1980 \cdot q^{-4}
 \tag{Equação 9}$$

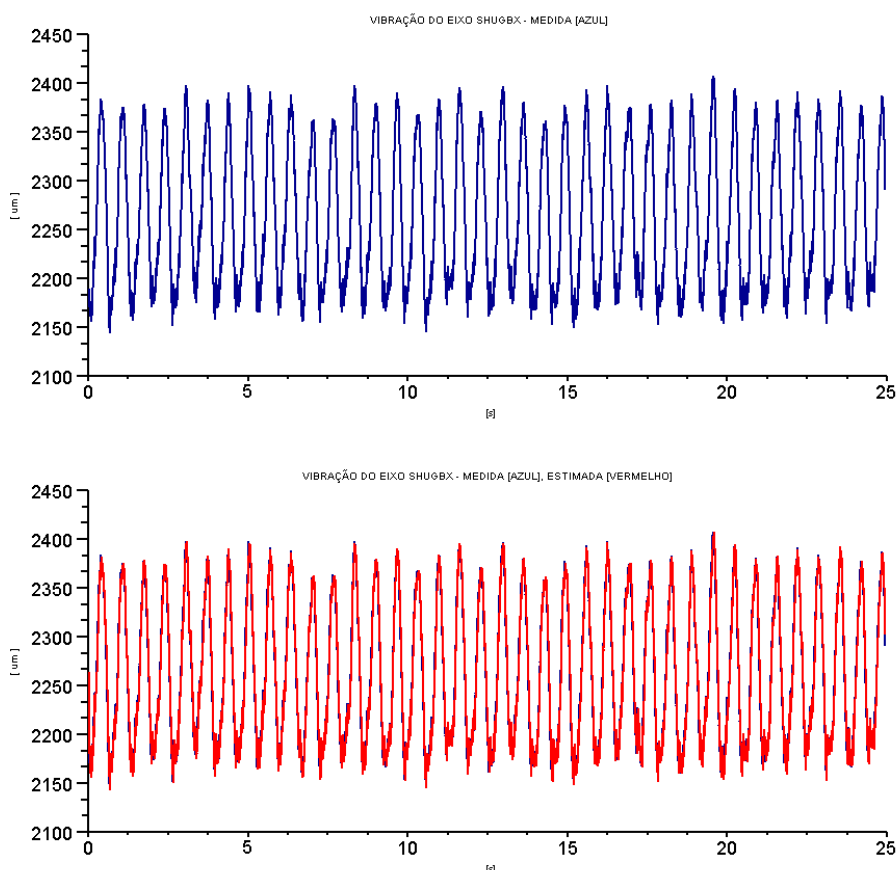


Figura 4 – Verificação do ajuste do modelo para vibração do eixo

4.0 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Resultados do Modelo ARX na Estimativa das Temperaturas do Mancal

A aplicação do modelo ARX para estimar temperaturas do mancal de escora apresentou resultados satisfatórios. Por limitação de espaço este informe não apresenta todos os resultados obtidos, mas pode-se afirmar que os modelos obtidos em vários trechos do período monitorado (2500 horas) são equivalentes.

4.2 Resultados do Modelo AR na Estimativa de Vibrações do Eixo

A aplicação de modelo AR para estimar vibrações do eixo também mostrou resultados satisfatórios. Neste caso, o modelo foi verificado para três vibrações do eixo distintas (SHUGBX – mancal guia superior, SHCOBX – mancal guia combinado e SHTGBX – mancal guia da turbina), em 10 medições diferentes realizadas ao longo de 12 meses, com potências e quedas diversas.

4.3 Aplicação de Modelos Auto-Regressivos no Monitoramento

Durante o registro das séries temporais para as diversas grandezas monitoradas, ou seja, ao longo do período analisado, o hidrogerador teve diversas paradas e partidas, inclusive pelo menos uma grande rejeição de carga. Também é importante relatar que não foram observadas alterações sensíveis no comportamento dinâmico desta máquina ou a ocorrência de outros fatos dignos de nota no histórico de operação e manutenção. Este quadro é coerente com a estabilidade dos parâmetros do modelo auto-regressivo relatada no item anterior.

Esta é uma condição necessária à aplicação deste tipo de modelos no monitoramento do hidrogerador em análise, entretanto, não é uma condição suficiente. Para que a aplicação seja bem sucedida, o processo deve ter sensibilidade adequada para detectar defeitos de pequena monta. Isto quer dizer que deve ser possível detectar as variações dos parâmetros do modelo causadas por pequenos defeitos, sem riscos significativos de falso positivo ou falso negativo nesta detecção.

Tal verificação está fora da abrangência deste trabalho. Por motivos óbvios, dificilmente esta verificação poderia ser feita de forma experimental. É mais razoável a aplicação dos modelos auto-regressivos nos sinais obtidos em simulações do comportamento dinâmico do hidrogerador, gerados por um outro modelo matemático devidamente calibrado, no qual poderiam ser inseridos defeitos (alterações nos parâmetros) de proporções controladas.

4.4 Trabalhos Futuros

O trabalho descrito neste informe técnico foi iniciado recentemente. Ele deverá prosseguir com aplicação sistemática destes modelos nas unidades geradoras da Usina Hidrelétrica de Itaipu. Os resultados da aplicação deste procedimento serão avaliados com o histórico de operação e manutenção das unidades citadas, bem como serão comparados com os resultados da aplicação de outros métodos convencionais (e.g. no caso de vibrações: monitoramento do valor médio quadrático, das componentes fundamentais e harmônicas, etc.).

A sensibilidade dos modelos ARMAX à defeitos incipientes também é um tema a ser aprofundado. Os modelos apresentados neste trabalho, quando exercitados, resultaram em respostas muito próximas dos valores medidos em campo. Estima-se que, quando os valores medidos forem alterados por defeitos, será verificada a discrepância entre estes e os valores calculados pelo exercício dos modelos, indicando claramente a falha incipiente.

O diagnóstico, baseado no desvio do valor monitorado e na árvore de falhas da unidade geradora, será complementado com um prognóstico, que informará o período de tempo previsto para a ocorrência de um defeito na unidade geradora ou para sua parada por proteção.

5.0 - CONCLUSÃO

Muitos dos sistemas de supervisão e de monitoramento ora em operação apenas verificam a violação de níveis máximos ou mínimos dos parâmetros monitorados, níveis estes relacionados com os limites físicos do equipamento. A extrapolação destes valores dispara uma ação automática do sistema, seja esta ação a emissão de um alarme de primeiro ou segundo estágio ou mesmo uma ordem de parada do equipamento em questão. É importante notar que os valores limites citados são atingidos somente em condições de máxima carga ou em estágio avançado de um defeito mecânico ou elétrico.

O uso de modelos matemáticos no monitoramento de máquinas rotativas estabelece um novo patamar na detecção de defeitos nestes equipamentos. Isto porque o equipamento é efetivamente monitorado em todos os pontos de operação, seja ele em baixa ou alta carga. Os limites de ação automática do sistema de monitoramento deixam de ser fixos e relacionados com os limites físicos do equipamento. Os novos limites estabelecidos são faixas mais estreitas de valores esperados. Qualquer desvio acima destes limites, para qualquer ponto de operação, dispara a ação do sistema de monitoramento, de acordo com a filosofia adotada.

Em plantas onde não se opera a plena carga por longos períodos, seja por limitações temporárias ou permanentes do equipamento, por baixa afluência hídrica ou outra razão qualquer, um defeito incipiente que modifique o valor monitorado de forma gradual poderá ser diagnosticado com grande antecedência de tempo, comparada com a supervisão ou monitoramento tradicional de condição. Mesmo na operação a plena carga, quando o equipamento é robusto e opera distante dos seus limites físicos, a mesma antecedência de detecção de defeitos poderá ser atingida.

6.0 - RECONHECIMENTO E AGRADECIMENTO

Este trabalho está baseado no trabalho de pesquisa e desenvolvimento do grande mestre Geraldo Carvalho de Brito Junior, com quem o autor teve o privilégio de trabalhar, e muito aprender, durante seis anos, no Departamento de Engenharia da Usina Hidrelétrica de Itaipu.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Assis Neto, J. Q., Ramos, R. A., Arriola, A., Ferreira, R.D. – MATRIX-UG – Especificação Técnica – INFRAESTRUTURA DO SISTEMA DE MONITORAMENTO DAS UNIDADES GERADORAS, R0, Itaipu Binacional, de 13/09/2013.
- (2) Ferreira, João A., Especificação Funcional SOMA - MATRIX, Eletrobras CEPEL, R0, de 10/04/2013.
- (3) Brito Jr., Geraldo C.; Assis Neto, J. Q., USO DE MODELOS AUTO-REGRESSIVOS NO MONITORAMENTO DE MÁQUINAS ROTATIVAS, IV ENAN, Curitiba – PR, set/2010.

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Autor: José Quirilos Assis Neto

Local de Nascimento: Umuarama – PR, Brasil

Data de Nascimento: 26/10/1964

Graduação: Engenharia Eletrônica – CEFET-PR (atual UTFPR), em 1986

Pós-graduação: - Gestão de empresas – Fundação Dom Cabral / UFMG, 1998

- Teleinformática – CEFET-PR, 1994

- Automação de Processos Baseados na Norma IEC-61850 – UNIOESTE, 2009

- Mestrado (não concluído) em Métodos Numéricos Aplicados à Engenharia – UFPR, 2013

Experiência Profissional:

- Copel Geração e Transmissão – automação e controle de usinas hidrelétricas – 1988 – 2008

- Itaipu Binacional – Automação de processos e monitoramento de unidades geradoras – 2008 -