



**XX SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
XXX.YY  
22 a 25 Novembro de 2009  
Recife - PE

**GRUPO I**

**GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH**

## **RESULTADO PRÁTICO OBTIDO COM O SISTEMA DE MONITORAÇÃO PREDITIVA ON-LINE**

**Vicente Borri (\*)  
Duke Energy Geração Paranapanema**

**Paulo S. Sebastiani  
Duke Energy Geração Paranapanema**

**Sanderson Pereira Simões de Souza  
M&D Monitoração e Diagnose**

### **RESUMO**

Este artigo discute o resultado obtido na aplicação de um sistema de monitoração on-line e diagnóstico para manutenção preditiva de hidrogeradores.

O objetivo principal do artigo é demonstrar a necessidade de utilização de um procedimento de análise dos dados, sem o qual, conclusões erradas podem ser obtidas e intervenções ineficazes realizadas.

O artigo está dividido em quatro partes: na primeira, a introdução, é apresentado breve histórico do problema, a seguir são apresentados os valores medidos e que subsidiaram as decisões tomadas pela empresa. Na terceira parte é apresentado um resumo da intervenção e finalmente as conclusões.

### **PALAVRAS-CHAVE**

Monitoração da Condição, Análise de Vibração, Órbitas, Manutenção Preditiva

#### **1.0 - INTRODUÇÃO**

As unidades geradoras da usina Capivara (CPV) apresentam desde o início da sua operação elevadas oscilações de eixo medidas no mancal de guia da turbina (MGT). Atualmente, a origem destas oscilações é conhecida, tendo sido identificada através de medições da pulsação de pressão no tubo de sucção. De acordo com os resultados de experimentos divulgados em artigo e livros, as turbinas hidráulicas do tipo Francis apresentam como característica normal de operação flutuações do escoamento em cargas parciais. Esse comportamento é causado por vórtice helicoidal, com forma de corda e que gira no centro do tubo de sucção. Esse tipo vórtice é conhecido como vórtice de núcleo ou trança. A ocorrência do fenômeno (trança) em cargas parciais, em suma, é a causa da elevada oscilação do eixo existente na usina Capivara.

A Duke Energy estuda e acompanha a evolução da oscilação causada pelos vórtices, bem como tem avaliado soluções para o problema. Duas soluções avaliadas para resolver o problema foram: a instalação de travessas no tubo de sucção e injeção de ar comprimido entre as palhetas diretrizes, porém, foram descartadas devido a restrições técnicas ou financeiras.

Com o objetivo de facilitar o acompanhamento da oscilação do eixo, em 2006 foi instalado nas unidades geradoras um sistema de monitoração on-line e diagnóstico. O sistema instalado realiza o acompanhamento do comportamento da unidade geradora através das seguintes variáveis: oscilação do eixo medida nos mancais de guia, potência ativa e queda bruta.

No primeiro semestre de 2007 durante a avaliação do histórico armazenado pelo sistema, através de ferramenta de análise de tendência, foi observado nível elevado de oscilação do eixo no mancal de guia da turbina na unidade geradora número 4 (UG-4). Em geral, este comportamento caracteriza problemas de desajuste das folgas do mancal.

No segundo semestre de 2007 durante uma parada programada foram verificados e confirmados os problemas de ajuste no mancal de guia da turbina desta UG, sendo realizada a correção apenas nos segmentos onde havia maior dispersão na órbita do eixo. Após as correções e com o retorno da UG-4 a operação foi confirmado o sucesso da intervenção realizada.

Passados mais de doze meses, do ajuste realizado no mancal de guia da turbina, a UG permanece em uma condição de oscilação estável atestando a importância da existência e do uso dos dados históricos de um sistema de monitoração on-line. A seguir, será apresentado de forma detalhada, como foi realizado o processamento dos sinais e a intervenção realizada na UG-4.

## 2.0 - MONITORAÇÃO DA OSCILAÇÃO DAS UNIDADES GERADORAS

A oscilação de eixo das UGs de Capivara é verificada com a aquisição de sinais de sensores de proximidade instalados nos mancais de guia, tanto da turbina, quanto do gerador. O sistema de manutenção preditiva faz a aquisição destes sinais em tempo real e compara com Referências, que representam a condição da UG em uma condição sem defeitos, ou com valores definidos como limites de acordo com as folgas nominais dos mancais.

A existência de um problema ou defeito é informada aos usuários através de e-mails, gerados automaticamente pelo sistema. De forma alternativa, os usuários também podem realizar verificações e consultas diretamente no sistema. Para isso, no sistema de monitoração existente em CPV tem-se várias ferramentas de análise, cuja função é auxiliar na avaliação dos dados armazenados pelo mesmo. Essas ferramentas permitem realizar comparações dos dados armazenados entre si (dados armazenados antes e depois da identificação da falha); com Referências; e com aquisições on-line.

A vantagem de utilizar essas ferramentas é poder identificar o início do desenvolvimento de um problema na UG, e com isso, permitir o investimento de um período de tempo maior no trabalho de processamento das informações, o que aumenta o entendimento sobre o fenômeno e facilita o diagnóstico da falha.

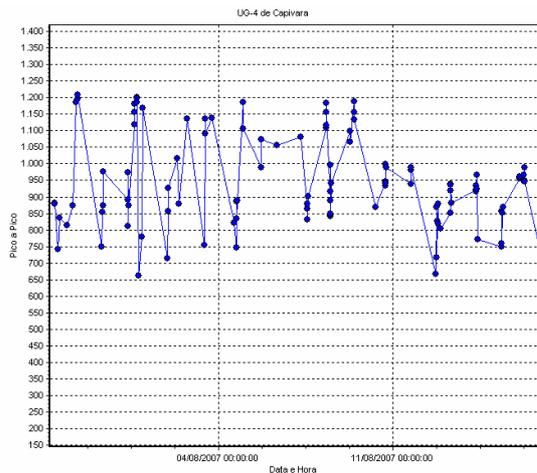
O objetivo principal do procedimento adotado, no caso específico da UG-4, foi identificar de forma mais precisa a causa do problema que estava provocando a elevada oscilação do eixo. Para isso, foram processados e analisados os sinais gravados pelo sistema. Após a identificação da causa, o objetivo tornou-se definir a melhor forma de atuar com a finalidade de melhorar a condição de trabalho da UG. A seguir, serão apresentadas as ferramentas utilizadas no processamento dos sinais.

### 2.1 Análise Sequencial

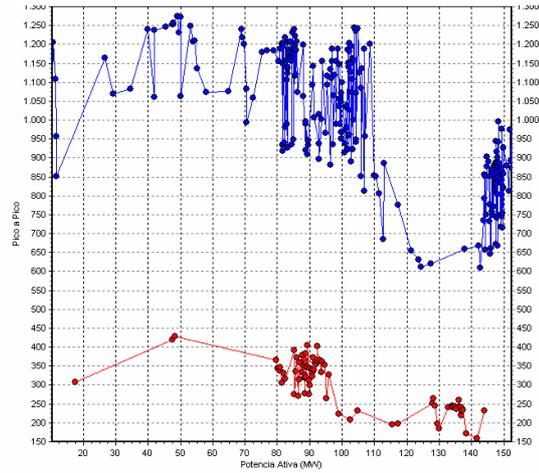
A ferramenta de Análise Sequencial disponível no sistema de monitoração de CPV, permite apresentar graficamente a evolução dos sinais de dois ou mais sensores diferentes e compará-los data-a-data pelos seus valores médios, RMS, pico-a-pico, desvio, máximo, mínimo ou bandas de frequência. Os valores dos sinais são apresentados em função da data em que foram gravados (data *versus* amplitude), ou em função da potência ativa em que a UG operava. A ferramenta também permite apresentar grupos de medições de períodos diferentes.

Na Figura 1 o gráfico da esquerda apresenta uma sequência de valores pico-a-pico de oscilação do eixo medida por um dos sensores de proximidade montados no MGT da UG-4. O período de tempo representado é anterior a intervenção realizada na UG. Nota-se no gráfico que o comportamento da oscilação não apresenta padrão de comportamento dependente do tempo.

Ainda na Figura 1, o gráfico da direita está apresentando duas sequências de valores pico-a-pico de oscilação do eixo. As sequências representam valores pico-a-pico de períodos de tempo diferentes do mesmo sensor de proximidade apresentado no gráfico da esquerda. A curva azul corresponde a um conjunto de sinais gravados antes da intervenção na UG, enquanto que a vermelha após a referida intervenção. Com o objetivo de facilitar a análise do comportamento da UG, ambas as curvas foram representadas em função da potência. Observa-se no gráfico que os valores pico-a-pico dos sinais representado pela curva azul (antes da intervenção) são pelo menos 3 vezes maiores que os sinais representados pela curva vermelha (após a intervenção). Além disso é possível identificar a faixa de potência para a qual os valores pico-a-pico apresentam grande redução de amplitude (entre 100 e 110 MW).



Análise sequencial ordenada por data.



Análise sequencial ordenada por potência.

Figura 1 – Gráficos de análise seqüencial.

Apesar de a ferramenta indicar a existência de um problema (curva azul), bem como o sucesso da intervenção realizada (curva vermelha), a mesma não fornece as informações necessárias para a identificação da causa, nem a respectiva solução. Desta forma, é necessário utilizar outras ferramentas, que possam extrair dos sinais as informações necessárias. No caso apresentado neste artigo foram utilizadas as ferramentas de Análise Comparativa e de Órbita.

## 2.2 Análise Comparativa

Esta ferramenta de análise permite realizar comparações entre sinais do mesmo equipamento sob diferentes condições operativas, ou mesmo de diferentes equipamentos. Os sinais são apresentados no domínio do tempo (tempo *versus* amplitude) e sob a forma de espectros ou espectro cruzado (frequência *versus* amplitude).

Na Figura 2, para que a comparação fosse a mais representativa possível, foram selecionados sinais em que a UG estava operando na mesma faixa de potência (+/- 130 MW). Os gráficos apresentados são de sinais gravados da UG-4 antes (azul) e após (vermelho) a intervenção. O sinal em azul é de uma aquisição realizada com a UG gerando 127 MW, onde a maior amplitude (RMS) do espectro é de 150  $\mu\text{m}$ . O sinal em vermelho é do mesmo sensor de proximidade, sendo que nesta medição a UG gerava 135 MW e a maior amplitude (RMS) do espectro é menor que 50  $\mu\text{m}$ .

Analisando os espectros de forma mais detalhada, nota-se que a componente de maior amplitude corresponde, em ambas as condições, à velocidade de rotação (100 rpm ou 1,6 Hz), que em geral é associada ao efeito causado pelo desbalanceamento do conjunto girante. Além disso, pode-se observar também, que nesta faixa de potência não se observa componentes de baixa frequência no espectro (frequências menores que a correspondente a da velocidade de rotação da UG), geradas pela trança. Resultado semelhante é observado no gráfico com o sinal no tempo, onde a amplitude pico-a-pico era de 620  $\mu\text{m}$  (condição de operação inaceitável) e após a intervenção de 240  $\mu\text{m}$  (condição de operação aceitável).

Baseado nesses indicativos, a primeira tentativa de solução para o problema seria realizar o balanceamento da UG, mas conforme será apresentado na próxima seção, a análise de órbita indicou um outro problema. Caso fosse realizado o balanceamento apenas, o problema não seria resolvido e uma nova parada seria necessária.

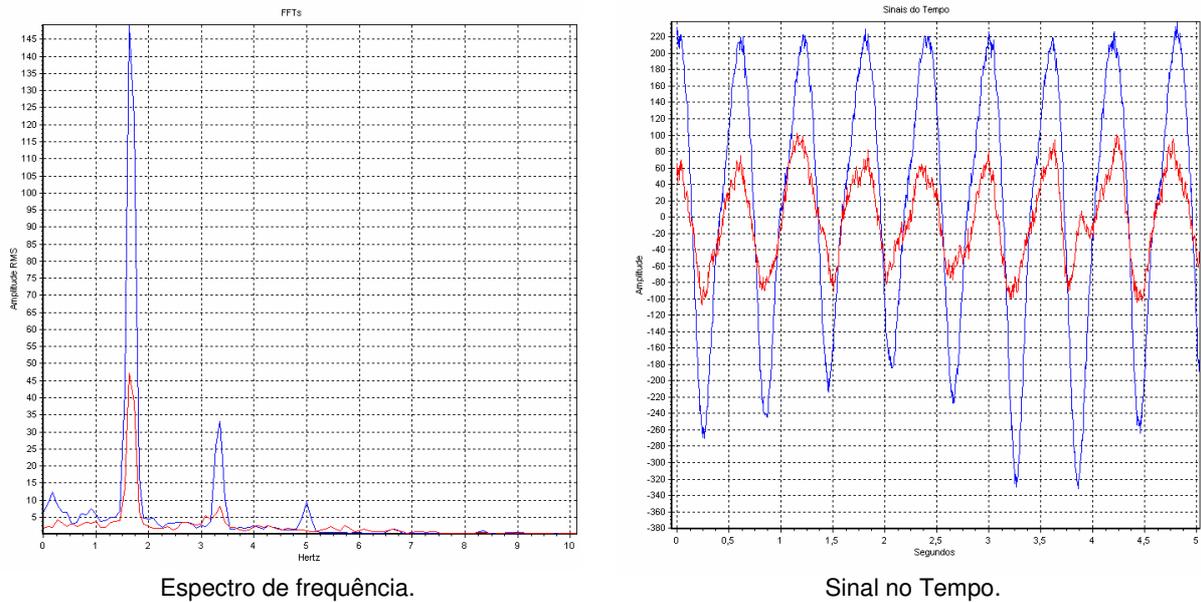


Figura 2 – Gráficos de análise comparativa.

### 2.3 Análise de Órbita

A ferramenta de análise de órbita permite representar graficamente as órbitas dos planos de medição de oscilação de eixo do equipamento. Essas órbitas são formadas pela composição de dois sinais de deslocamento radial do eixo, que são medidos por sensores de proximidade montados nos mancais, em um mesmo plano e perpendiculares entre si. Os deslocamentos nas direções X e Y são apresentados graficamente em uma quantidade de voltas (órbitas) definidas pelo usuário.

Em geral, a identificação de falha através da análise de órbita é muito difícil, já que é representado em um mesmo gráfico todas as informações de amplitude, frequência e fase dos dois sinais e de forma simultânea. Para a análise do problema verificado de alta oscilação de eixo da UG-4, foram feitas análise de órbita em três faixas de potência: entre 0 a 50 MW, de 50 a 100 MW e acima de 100 MW.

Nos dois primeiros grupos de análise, ou seja, de 0 a 100 MW, a dispersão dos sinais ficou muito grande possivelmente devido ao fato da UG não operar regularmente nessa faixa. Baseado nisso, não foi possível extrair informações que pudessem auxiliar na solução do problema.

Na faixa acima de 100 MW foi verificado que o comportamento fica mais constante, quando comparado com o observado nas potências inferiores. Além disso, fica evidente que no lado superior esquerdo da órbita o eixo praticamente passa pela mesma região (pequena dispersão do sinal) e no canto oposto do gráfico o eixo, a cada volta, passa por um ponto diferente (grande dispersão do sinal), conforme pode ser observado no gráfico esquerdo da Figura 3.

No gráfico da esquerda da figura 3 ilustramos a órbita do MGT (na cor azul) e também a órbita do MGG (na cor vermelha), que foram medidas de forma simultânea. Considerando que a folga nominal definida em projeto é a mesma para os dois mancais, ao se comparar a amplitude dos sinais das duas órbitas (MGT e MGG), tem-se uma indicação da gravidade da condição da UG.

Após a realização da intervenção no MGT a mesma análise foi realizada, com o objetivo de avaliar o seu resultado. Para isso, foram comparadas duas órbitas do MGT: uma que representava a condição da UG antes da intervenção (na cor azul) e outra que representava a condição após a intervenção (na cor vermelha). Além disso, para que a comparação fosse a mais representativa possível, foram selecionados sinais gravados no banco de dados do sistema, cuja potência de operação da UG era de aproximadamente 130 MW.

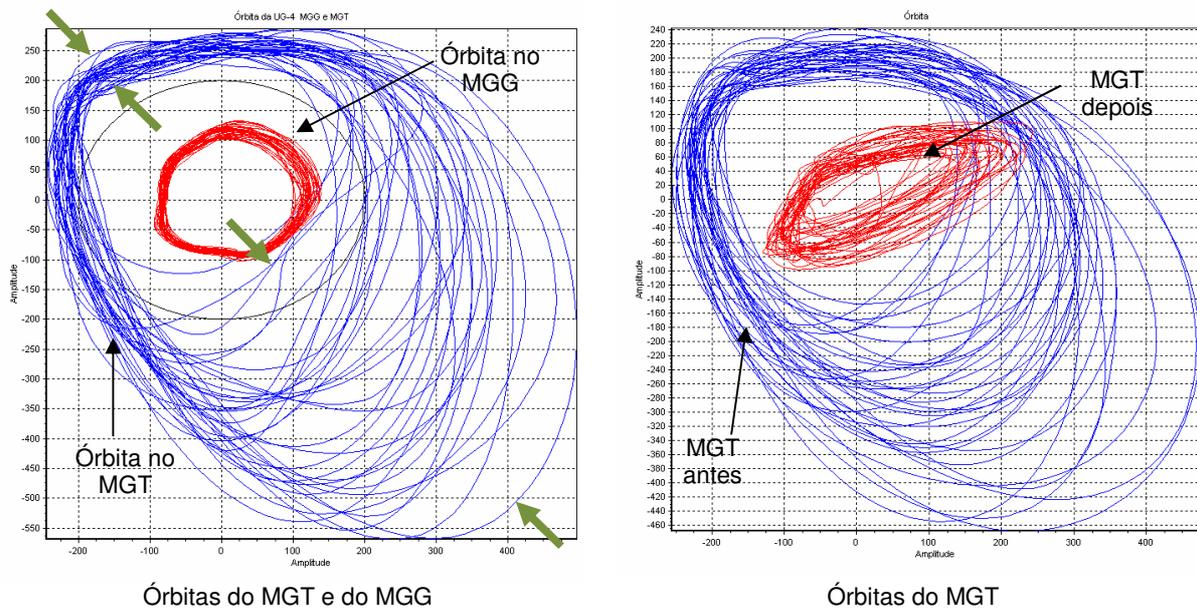


FIGURA 3 – Gráficos de análise de órbita.

Conforme pode ser observado no gráfico da direita da Figura 3, a redução da amplitude da órbita é considerável atestando o sucesso da intervenção realizada.

### 3.0 - INTERVENÇÃO REALIZADA NA UG-4

Os mancais de guia das UGs de CPV são do tipo deslizante, com 12 segmentos. Os segmentos são ajustados individualmente através de parafuso de regulagem e porca de trava para manter o segmento na posição ajustada, conforme pode ser observado na Figura 4.

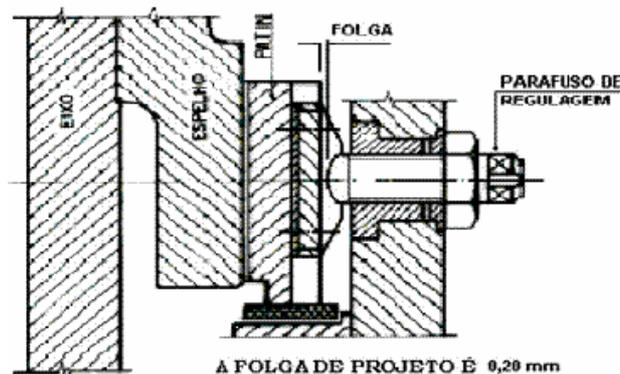


Figura 4 – Corte do MGT.

Utilizando as informações do gráfico de órbita, foi possível verificar que o eixo estava com um grau de liberdade muito grande, em geral decorrente de folga excessiva do MGT.

A Figura 5 apresenta a órbita do eixo da UG-4 medida no MGT. No gráfico estão representados vários sinais medidos com potência acima de 100 MW, cada um com uma cor diferente. Também está representada neste mesmo gráfico a posição física de cada um dos sensores de proximidade montados no MGT (Proxímetro JU e Proxímetro ME). Devido às características apresentadas pelas órbitas, foi considerado que o excesso de folga estava ocorrendo em apenas alguns segmentos do mancal, naqueles localizados na região em que a órbita apresentava maior dispersão. Baseado nessa hipótese sobre as órbitas, foi adicionada uma figura de forma elíptica, para representar a "órbita média" do mancal com excesso de folga.

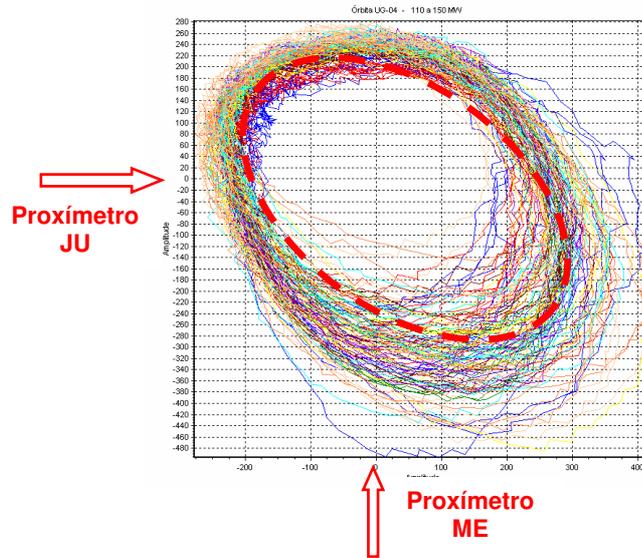


Figura 5 – Análise da órbita do MGT da UG-4 antes da intervenção com várias aquisições em potência acima de 100 MW.

Considerando que a “órbita média” do mancal com folga corretamente ajustada possui dispersão semelhante em todas as direções, a figura elíptica obtida indica a região do mancal com maiores amplitudes de oscilação do eixo e conseqüentemente uma indicação dos segmentos do mancal que estão precisando de ajuste. A etapa seguinte do processo foi transportar a “órbita média” do mancal com excesso de folga para um diagrama esquemático dos segmentos dos mancais, conforme apresentado na Figura 6. É importante destacar que as posições dos sensores nas Figuras 5 e 6 não são as mesmas, sendo necessário então girar a “órbita média” de um ângulo de 90 graus para que as direções Jusante e Margem Esquerda das duas Figuras coincidam.

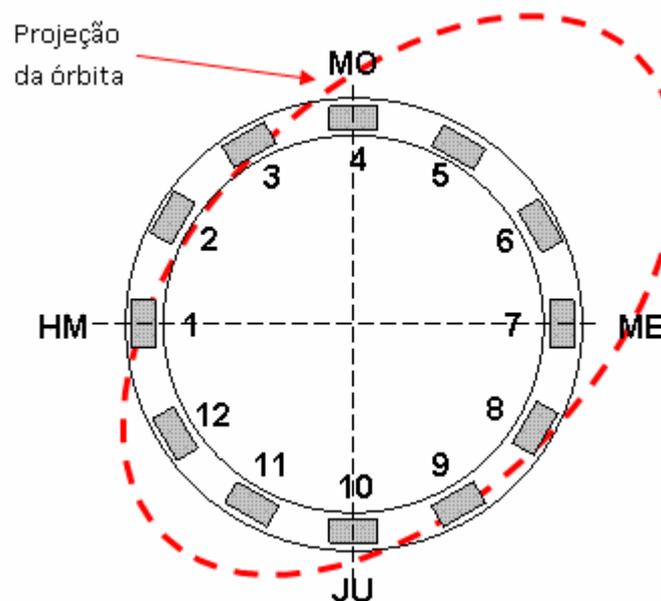


Figura 6 – Identificação dos segmentos em relação à posição montante (MO), margem esquerda (ME), jusante (JU) e hall de montagem (HM).

Após a identificação correta do problema, foi definida a melhor forma para a correção do problema: a diminuição das folgas, ajustando os segmentos do mancal na região onde a órbita estava mais dispersa. Assim, foi mantida a posição fixa de metade dos segmentos e realizada intervenção na outra metade, ajustando a folga nas medidas nominais (400  $\mu$ m).

Antes da intervenção propriamente dita, também foi tomado o cuidado de verificar o valor da inclinação do eixo, sendo a sua direção favorável a realização da intervenção nos segmentos, evitando assim, o risco de alterar a verticalidade da UG.

Como resultado desse processo de análise, foi realizada a intervenção de forma ótima devido ao fato do problema estar precisamente identificado. Além disso, as ações corretivas também foram previamente estabelecidas.

As indicações de folgas excessivas representadas no gráfico de órbita foram confirmadas quando UG foi parada para correção. A confirmação foi realizada colocando um relógio comparador entre o eixo e a caixa do mancal e macaqueando o mesmo, com isso foi possível verificar o curso do eixo de um extremo a outro nas duas direções em que os sensores de proximidade (x e y) foram montados.

É importante destacar que a parada da UG foi realizada de forma programada e todos os procedimentos para liberação do equipamento e acesso para a regulação do mancal foi realizado em um dia.

#### 4.0 - CONCLUSÕES

O sistema de monitoração e diagnóstico implantado na usina Capivara é eficiente e as ferramentas de análise são de fácil utilização.

Do ponto de vista do procedimento de análise dos sinais de vibração, a identificação do problema e a determinação das ações de correção foram facilitadas pela estratégia de análise utilizada pela Duke. Inicialmente foi observado o histórico da UG, para nas etapas seguintes realizar análises detalhadas dos sinais. Também é importante destacar o fato da órbita ter sido utilizada para solucionar o problema, já que em geral a sua interpretação é difícil. Caso apenas o espectro tivesse sido utilizado, não seria possível identificar corretamente o problema da UG. Em consequência disso, a oscilação do eixo continuaria elevada, sendo necessário realizar nova intervenção. Ou seja, o estabelecimento de um procedimento de análise é fundamental para a correta identificação da falha da UG.

Do ponto de vista gerencial, a utilização de sistemas de monitoração on-line é indispensável quando existir problema conhecido na UG e que justifique tal investimento. Nesses casos, o investimento realizado apresenta retorno com ganho de tempo e melhoria na qualidade das intervenções realizadas nas UGs.

Para o caso específico das unidades geradoras da UHE Capivara, que já possuem considerável tempo de operação, estas conclusões puderam ser tomadas tomando-se por base uma referência de medições off line que foram realizadas.

Logicamente não se pretende com este trabalho defender esta ou outra solução, mas defender um ponto de vista que deve ser ponderado pelo investimento a ser realizado e os problemas existentes.

Em suma, o que se defende neste trabalho é a necessidade de extrair resultados dos dados monitorados e não simplesmente monitorar por monitorar. Além disso, a monitoração permite que se conheça de forma precisa o comportamento das UGs, o que por sua vez, possibilita identificar as falhas que estão se desenvolvendo, bem como otimizar a intervenção.

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Manual do Usuário do Sistema MDM – Monitoração e Diagnóstico Automático;

(2) Machinery Malfunction Diagnosis and Correction – Vibration Analysis and Troubleshooting for the Process Industries – R. C. Eisenmann, Editora Hewlett-Packard Professional Books, 1997.

## 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Vicente Borri

Nascido em Mococa, SP, em 21 de Novembro de 1966.

Pós Graduação: Gestão Empresarial (2003) / FIO – Ourinhos; Engenharia de Produção (2005) / UNESP – Bauru  
Graduação (1994) em Engenharia Mecânica: USF Itatiba – São Paulo

Empresa: Duke Energy Geração Paranapanema, desde 1999.

Engenheiro Mecânico, Gerência Geral de Produção.

Paulo Sérgio Sebastiani

Nascido em Batatais, SP, em 29 de Abril de 1966.

Técnico Mecânico Sênior – Escola Estadual de 1º e 2º graus Antonio de Pádua Cardoso – Batatais.

Empresa: Duke Energy Geração Paranapanema, desde 1999.

Técnico Mecânico Sênior, Gerência Geral de Produção – Pólo de Capivara.

Sanderson Pereira Simões de Souza

Nascido em Recife, PE, em 02 de Janeiro de 1972.

Mestrado em Engenharia Mecânica (2000) na COPPE/UFRJ, Pós-graduado em Engenharia de Manutenção  
(1996) pela ABRAMAN, Graduação em Engenharia Mecânica (1995) na UFRJ.

Empresa: M&D Monitoração e Diagnose desde 2004.

Engenheiro de Desenvolvimento.