



GGH/017

21 a 26 de Outubro de 2001  
Campinas - São Paulo - Brasil

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

**ABORDAGEM DE MANUTENÇÃO NA DETERMINAÇÃO DA RECENTRAGEM DE MANCAIS DE  
GUIA DE UNIDADES HIDROGERADORAS VERTICAIS**

Fernando Antonio Blanco Resende

FURNAS

**RESUMO**

Este trabalho tem por objetivo divulgar a experiência adquirida por Furnas na recentragem de hidrogeradores verticais com um mancal conjugado imediatamente abaixo do gerador (apoiado numa cruzeta inferior) e um mancal guia na turbina, em virtude de problemas de:

- elevação de oscilação;
- temperatura desuniforme nas sapatas de guia do mancal conjugado;
- roçamento nos anéis de desgaste da turbina;
- operação do relé de fase dividida do gerador;
- defasagem ( $180^0$ ) entre desbalanceamento mecânico e elétrico;
- alteração da órbita descrita pelo eixo.

Para tais problemas vem-se adotando soluções de baixo custo e ótimos resultados, voltados para a convivência com as condições geométricas existentes do rotor e estator do gerador.

**PALAVRAS-CHAVE:** Manutenção, Balanceamento, Alinhamento, Centragem, Oscilação

**1.0 CONSIDERAÇÕES GERAIS**

A diversificação e a quantidade de intervenções em unidades hidrogeradoras, permite obter uma gama razoável de comportamentos frente a diversas condições de centragem, compatíveis com as condições operacionais de cada unidade geradora.

Foram utilizados ao longo de décadas de manutenção critérios, que em função do fabricante e da época, adotavam filosofias diferentes, que a nosso ver cumpriram efetivamente seu papel. Estes métodos e a

análise de seus resultados operacionais e financeiros culminaram no método que hoje vem sendo adotado por Furnas, e que consiste basicamente da adoção dos centros geométricos das partes fixas, quais sejam, os anéis de desgaste e estator como determinantes do centro de rotação da unidade geradora, ficando a inclinação como uma consequência operativa. Em presença de dificuldades inerentes ao sistema elétrico, como por exemplo, o tempo de indisponibilidade da unidade geradora, pode-se vir a adotar o centro geométrico do estator como referência de centragem, mantendo-se o mesmo posicionamento do mancal guia da turbina, que pode ser alterado numa futura intervenção caso necessário, através de um *run-out*, tomando-se como referência o centro no *mgg*. Vale a pena ressaltar que alterações no centro de rotação da turbina podem introduzir excitações hidráulicas indesejáveis em certas condições de abertura do distribuidor e níveis de montante e jusante.

Qualquer que seja a opção adotada, é importante a centragem do *mgg* em relação ao formato do estator, para que a atuação das forças magnéticas seja a mais homogênea possível e não implique alteração significativa do centro de giro do rotor do gerador, quando em carga. Tal condição, facilita o balanceamento da unidade geradora, conseguindo-se reduzir a oscilação da máquina em carga sem prejuízo para sua operação mecânica.

Este critério de centragem nada mais é que a efetivação do centro de trabalho da unidade que corresponde ao centro procurado pela unidade quando em carga, como centro do *mgg*, ou seja, a unidade geradora indica qual o melhor centro de rotação em operação, traduzido pelo centro do estator, que será adotado como centro do *mgg*.

fblanco@furnas.com.br

Departamento de Equipamentos Rotativos  
Rua Real Grandeza, 219 sala 701A - Rio de Janeiro - RJ  
CEP 22283-900 Tel.: (21) 5285747

A localização mais precisa do centro geométrico do estator, tem sido conseguida em unidades que possuem sistema de injeção nas sapatas de escora, que permitem a rotação em baixas velocidades. Com o auxílio de sensores de proximidade instalados na parte superior e inferior do rotor do gerador, são obtidas as medidas que definem o formato estático do estator. Através de uma planilha eletrônica calcula-se a variância das concentricidades (ou qualquer outra forma de cálculo que determine o melhor centro de trabalho), bem como as movimentações necessárias para que se atinja o melhor centro possível.

A seguir apresentamos resumidamente alguns exemplos reais internos a FURNAS, que nortearam este critério que vem sendo adotado, cuja riqueza de informações nem sempre é o desejado, mas que filosoficamente são boas referências.

## 2.0 HISTÓRICO

### 2.1 USINA DE MASCARENHAS DE MORAES

Esta usina composta por 10 unidades geradoras envolvendo 4 tipos de conjuntos idênticos, todos com um mancal conjugado abaixo do rotor do gerador apoiado numa cruzeta e um mancal de guia na turbina tipo bucha, iniciou sua operação em 1956, passando para Furnas em 1973. Estas unidades têm potência nominal variando de 40 a 52 MW, não possuem sistema de injeção de óleo nas sapatas de escora e os mancais de guia conjugados, são constituídos de sapatas independentes e ajustáveis.

#### 2.1.1 Unidade Geradora 3

Esta unidade entrou em operação em 24.07.60, apresentando a partir de então, uma ovalização no anel de desgaste inferior fixo, que foi sendo acompanhado através das medições de folga ao longo dos anos, até que em 1995 ocorreu roçamento entre os anéis de desgaste fixo e móvel, constatado através de presença de ruído, inspeção e medições de folga. A única opção até então executada praticamente passava pela desmontagem da unidade geradora para correção do problema sabidamente situado na parte estática. Face à urgência de retorno da unidade ao sistema, à experiência adquirida com centragem de unidades e à confirmação de que a continuidade de deformação do anel de desgaste não vinha sendo observada pelas últimas medidas de folga, foi realizada uma recentragem do conjunto tomando-se como referência o formato do anel de desgaste. A unidade foi centrada no mancal de guia da turbina em relação às folgas do anel de desgaste inferior (alterado o centro de rotação do mancal guia da turbina tipo bucha), que chegou a atingir estaticamente valores radiais da ordem de 0,16

mm (10% do valor nominal), o que representa a folga diametral nominal do mancal guia da turbina.

Objetivando a não alteração do centro da unidade ao nível do mancal guia da turbina, estabelecido estaticamente, foi melhorada a centragem em relação ao estator do gerador. Como consequência, a inclinação do eixo que era da ordem de 0,033 mm/m definida pelo plano de escora, passou para 0,056 mm/m segundo os centros dos mancais de guia, posição de trabalho da unidade quando em operação no sistema. Os valores de oscilação e temperatura permaneceram inalterados antes e após a intervenção.

A unidade apresenta-se em operação até o momento (6 anos aproximadamente), sem apresentar quaisquer problemas de roçamento. A modernização desta unidade assim como das demais está sendo viabilizado inicialmente através das unidades 5 a 8.

A unidade que por motivos de roçamento na turbina, teve os centros do mancal guia da turbina e do mancal guia do gerador alterados, com objetivo de uniformizar o entreferro do gerador e a folga no anel de desgaste inferior, ficou com uma inclinação em operação, bem superior ao estipulado em norma, sem alterações significativas nas temperaturas dos mancais.

A intervenção foi realizada em 40 dias, e caso tivesse sofrido uma desmontagem, o tempo de máquina parada seria de 120 a 150 dias, significando portanto, uma solução com um custo bem inferior ao de uma desmontagem, que seria necessária, caso fossem adotados os padrões básicos de montagem de uma unidade geradora. O serviço definitivo, que envolve desmontagem completa para correção do anel de desgaste, será executado quando da modernização da unidade.

#### 2.1.1. Unidade Geradora 7

Esta unidade apresenta desde o início de operação em 22.05.68 inclinação da ordem de 0,24 mm/m definido pelo plano de escora, valor este muito superior ao estipulado em norma e nunca foi indicativo de problemas operativos. A unidade foi montada inclinada apresentando sempre valores reduzidos de oscilação e sem diferença notável de temperatura nos mancais, não existindo portanto motivos para alteração do prumo para enquadrá-lo a valores determinados em norma.

Tal fato, identifica o posicionamento da unidade independente de sua inclinação de modo que em operação a unidade tenha o melhor comportamento, vislumbrado pelos valores baixos de oscilação nas diversas condições de operação e por uma boa distribuição de temperatura, evidenciando consequentemente que, mesmo trabalhando com inclinação acima da prevista em norma, uma Unidade Geradora pode perfeitamente trabalhar dentro da normalidade.

## 2.2 USINA DE FURNAS

Esta usina, iniciou sua operação em 1957 e era comum realizar-se periodicamente a centragem da bucha do mancal guia da turbina em função das folgas encontradas no mancal guia da turbina, ou seja, após centragem da unidade geradora no mancal guia do gerador, realizava-se a medição de folga no mancal guia da turbina cujos valores fatalmente não indicariam uma boa distribuição já que o eixo em função do seu passeio (run-out), pode parar em qualquer posição. Tal constatação fazia com que a bucha do mancal fosse movimentada e pinada em outra posição para que fossem obtidas folgas distribuídas. Hoje podemos afirmar que as furações para pinagem registraram o passeio (run-out) do eixo e que a menos que a unidade seja posicionada sempre no mesmo lugar (polo em frente à ranhura), as folgas irão diferir de uma parada para outra.

Em uma fase posterior, praticamente todas as unidades foram submetidas a centragem pelo processo de run-out, que nada mais é do que adotar-se o centro da turbina como referência e transmiti-lo ao centro do mancal guia do gerador praticamente sem preocupação com a distribuição de entreferro do gerador. Na maioria das unidades (num total de oito), este procedimento teve sucesso, já que as alterações não foram tão significativas e não acarretaram uma má distribuição do entreferro do gerador. Em algumas, ocorreu uma melhora na oscilação mecânica, mas sem correspondência elétrica, e esta melhora, acabou sendo prejudicada pelo balanceamento, para que em carga a unidade geradora atingisse níveis de oscilação razoáveis.

Esta usina composta por 8 unidades geradoras e 2 tipos de conjuntos idênticos, todos com um mancal conjugado abaixo do rotor do gerador apoiado numa cruzeta e um mancal de guia na turbina tipo bucha. As unidades têm potência nominal 164 MW, possuem sistema de injeção de óleo nas sapatas de escora e mancal de guia conjugado com sapatas independentes.

### 2.2.1 Unidade Geradora 2

Esta unidade iniciou sua operação comercial em 29.11.63. Recentemente, apresentou problemas de aquecimento no mancal guia da turbina com indicação de alarme. Após desmontagem e inspeção, verificou-se descolamento na região correspondente ao bulbo do termômetro, sendo então substituído o mancal. Como procedimento padrão, a unidade geradora foi centrada no mancal de guia do gerador e através de um run-out foi promovido o alinhamento mecânico dos mancais. Este deslocamento alterou as condições de distribuição de entreferro, piorando os valores de concentricidade.

No retorno da unidade, a oscilação da unidade geradora ficou superior aos 80% da folga do mancal (folga diametral do  $mgg = 0,40\text{mm}$ ), apresentando defasagem de  $180^\circ$  entre os pontos mais pesados, na condição mecânica e em carga. O problema, gerou suspeita com relação ao comportamento elétrico do gerador com conseqüente realização de testes de queda de tensão nos polos, sem nada ser detectado.

Retornou-se por conseguinte, à posição original de centro da unidade geradora ao nível do mancal guia do gerador que representava uma menor variação do entreferro, possibilitando o balanceamento com defasagem de  $180^\circ$  entre as condições mecânica e elétrica. Caso fosse realizado um deslocamento visando a melhor distribuição de entreferro, certamente os valores de oscilação teriam ficado mais baixos, não persistiria a defasagem e ocorreria a uniformização das oscilações em posições ortogonais.

Valores de oscilação antes da manutenção ( pico a pico em mm )

Condição	Mancal guia do gerador		Mancal guia da turbina	
	MD	ME	MD	ME
Mecânica	<b>0,51</b>	<b>0,54</b>	0,20	0,19
Excitada	0,10	0,19	0,06	0,05
150 MW	0	0,31	0,03	0,08

(\*) Valores em negrito, acima do limite de 80% da folga do mancal

Valores de oscilação após a manutenção ( pico a pico em mm )

Condição	Mancal guia do gerador		Mancal guia da turbina	
	MD	ME	MD	ME
Mecânica	0,29	<b>0,39</b>	0,15	0,14
Excitada	0	0,21	0,06	0,07
150 MW	0	0,10	0,02	0,02

(\*) Valores em negrito, acima do limite de 80% da folga do mancal

### 2.2.2 Unidade Geradora 6

A unidade apresentou um aumento de oscilação (acima de 80% da folga diametral) ao nível do mancal combinado do gerador com uma diferença de temperatura em carga de aproximadamente  $6^\circ\text{C}$  entre sapatas diametralmente opostas. Esta unidade sempre apresentou uma limitação nos níveis de oscilação, fruto de uma defasagem de  $180^\circ$  entre os pontos mais pesados nas condições mecânica e em carga (150 MW), medidos durante o balanceamento. O serviço, em face do sintoma apresentado e da dificuldade de balanceamento desta unidade, consistiu na verificação de dois pontos principais, quais foram:

- Inspeção e verificação das folgas das sapatas de guia do mancal combinado do gerador;
- Uniformização do entreferro do gerador.

As sapatas de guia não apresentaram qualquer anormalidade nas inspeções por ultra-som e líquido penetrante nem alterações significativas das folgas radiais.

A unidade geradora apesar de apresentar uma distribuição de entreferro com 1,71% dos pontos com concentricidade acima do valor máximo permitido em norma (NBR-13224), o que não justificaria qualquer alteração, sofreu um deslocamento do centro do conjunto girante de 0,44 mm (0,36 mm→E, 0,25 mm→M, ao nível do *mgg*), superior inclusive à folga diametral do mancal (0,40 mm) que promoveu redução de 42 % na variância (quadrado do desvio padrão) das concentricidades.

Tal movimentação de bem que manteve a quantidade de pontos com concentricidade acima do valor máximo permitido (1,71%), proporcionou primeiramente uma uniformização da órbita e posteriormente, após o balanceamento, uma redução acentuada nos níveis de vibração com a unidade geradora em carga, como pode ser visto na tabela abaixo.

Valores de oscilação antes da manutenção ( pico a pico em mm )

Condição	Mancal guia do gerador		Mancal guia da turbina	
	MD	ME	MD	ME
Mecânica	0,31	0,31	0,08	0,11
Excitada	<b>0,35</b>	<b>0,43</b>	0,09	0,16
150 MW	0,28	<b>0,45</b>	0,08	0,13

(\*) Valores em negrito, acima do limite de 80% da folga do mancal

Valores de oscilação após a manutenção ( pico a pico em mm )

Condição	Mancal guia do gerador		Mancal guia da turbina	
	MD	ME	MD	ME
Mecânica	0,25	0,24	0,10	0,09
Excitada	0,09	0,09	0,07	0,06
150 MW	0,08	0,08	0,07	0,06

Vale a pena lembrar que o alto valor de deslocamento aplicado (acima da folga do mancal) não seria em hipótese alguma adotado sem o balizamento matemático (variância) e caso fosse constatada uma interferência exagerada entre mancais que impedisse ou prejudicasse o giro manual da unidade.

No último balanceamento realizado nesta unidade os valores de oscilação foram limitados pela defasagem de aproximadamente 180° entre os pontos mais pesados

nas condições mecânica e em carga, problema atualmente solucionado através do deslocamento realizado no centro da unidade ao nível do gerador, que passou a apresentar uma órbita circular e uma defasagem de aproximadamente 90° entre a condição mecânica e em carga, viabilizando a obtenção de níveis de oscilação mais baixos em carga.

Mecanicamente a unidade não apresentou alteração na diferença de temperatura entre os termômetros E1 e F1 em relação à condição anterior, tanto mecânica como eletricamente. A diferença de temperatura registrada mecanicamente pode ser corrigida através de um alinhamento de mancais tomando-se como referência o centro do *mgg*, sem entretanto, deixarmos de estar conscientes da possibilidade de serem gerados distúrbios hidráulicos.

### 2.3 USINA DE ITUMBIARA

Esta usina, composta por 6 unidades geradoras, todas com um mancal conjugado abaixo do rotor do gerador apoiado numa cruzeta e um mancal de sapatas de guia na turbina. As unidades têm potência nominal 380 MW e possuem sistema de injeção de óleo nas sapatas de escora. Sua operação foi iniciada em 1980 e suas unidades apresentam, em sua maioria, diferenças entre termômetros opostos do mancal de guia do gerador, causado pelo elevado número de pontos numa determinada região do estator, com concentricidade acima do limite permitido em norma. Todas as unidades foram centradas em função do run-out, prevalecendo o centro da turbina, em detrimento do centro, segundo o estator do gerador.

#### 2.3.1 Unidade Geradora 1

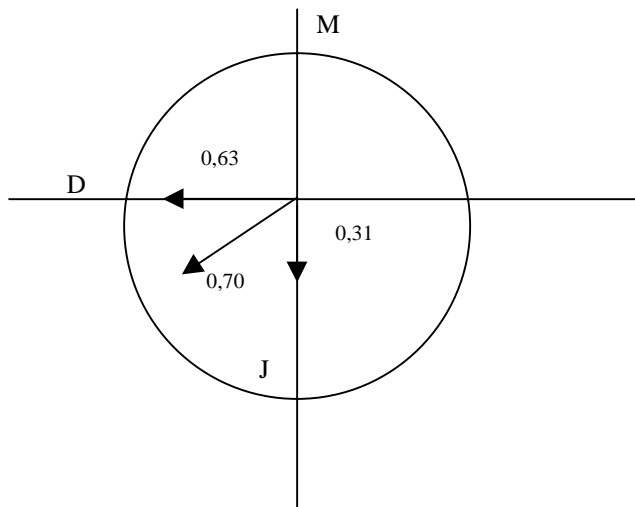
Esta unidade apresentou problemas de diferenciação de temperatura entre sapatas opostas no mancal guia do gerador, atingindo valores de 4°C e 16°C, mecanicamente e com 270 MW respectivamente, mantendo-se sempre o termômetro I (ME) maior que o II (JD). A figura 1 exemplifica o posicionamento dos termômetros. Antes da parada da unidade foram realizadas medidas de oscilação e deslocamento do centro da unidade geradora ilustrados abaixo:

Condição	Mancal guia do gerador		Mancal guia da turbina	
	MD	ME	M	D
Mecânica	0,39	0,29	-	-
Excitada	0,24	0,57	-	-
150 MW	0,25	0,27	-	0,06

Os deslocamentos relativos às diversas condições foram:

Condição	Mancal guia do gerador		Mancal guia da turbina	
	MD	ME	M	D
Mecânica	0	0	-	-
Excitada	0,39	-0,41	-	-
270 MW	0,39	-0,47	-	-

Os valores registrados do formato do estator, indicam problemas acentuados de concentricidade, com 64% dos pontos com valores acima do máximo permitido, o que equivale a 172 pontos com concentricidade acima do valor máximo (0,91 mm), e a verificação da variância (quadrado do desvio padrão) das concentricidades indica a necessidade de movimentação do rotor do gerador para que haja uma melhor distribuição do entreferro. Foram realizadas duas movimentações, que culminaram com uma movimentação total de 0,63 mm na direção D e 0,31 mm para a direção J, ao nível médio do *mgg*, o que equivale a um deslocamento de 0,70 mm, 26,2° a partir da Direita no sentido anti-horário, conforme croquis abaixo:



**Deslocamento o nível do *mgg***

Após o deslocamento adotado acima, realizou-se nova medida do formato do estator que não indicou a existência de pontos com valores de concentricidade acima do máximo permitido e a variância foi reduzida para 0,046846, o que equivale a uma redução de 95,5% em relação ao inicialmente medido (1,028829). A avaliação da necessidade de movimentação do conjunto girante em função do novo posicionamento, não indicou a necessidade de qualquer movimentação adicional. Após a rodada e balanceamento as

oscilações no *mgg* e no *mgt* nas condições mecânica, excitada e em carga, apresentaram os seguintes valores:

Condição	Mancal guia do gerador		Mancal guia da turbina	
	MD	ME	M	D
Mecânica	0,18	0,15	0,04	0,04
Excitada	0,17	0,19	0,05	0,03
280 MW	0,14	0,12	0,05	0,03

Estes valores além de indicarem uma redução nos valores de oscilação, demonstram também uma uniformização da órbita, o que não ocorria anteriormente.

Percentualmente em relação à medição inicial, teremos os seguintes valores:

Condição	Mancal guia do gerador		Mancal guia da turbina	
	MD	ME	M	D
Mecânica	-53,8 %	-48,3 %	-	-
Excitada	-29,2 %	-66,6 %	-	-
280 MW	-44,0 %	-55,5 %	-	-50,0 %

Os deslocamentos relativos às diversas condições foram:

Condição	Mancal guia do gerador		Mancal guia da turbina	
	MD	ME	M	D
Mecânica	0	0	0	0
Excitada	0,02	-0,02	-0,01	-0,01
280 MW	-0,01	-0,17	-0,05	-0,03

O prumo da unidade medido durante a última inspeção foi de 0,037mm/m com direção 26° de Jusante no sentido anti-horário, e em virtude da movimentação realizada na unidade geradora ao nível do *mgg*, considerando-se o conjunto girante centrado em ambos os mancais guia, a inclinação de trabalho passará a ser de 0,114 mm/m com direção de 45° de Jusante no sentido horário.

### 3. CONCLUSÃO

Todas as unidades que apresentaram uma não uniformidade na distribuição de entreferro, tiveram em carga ou excitada, uma movimentação do gerador, sempre no sentido do menor entreferro, varrendo praticamente toda a folga do mancal, ou seja:

- posicionamento da unidade em operação (centro de trabalho) define uma nova inclinação da unidade, através da não uniformidade dos esforços radiais

gerados quando do surgimento de forças de origem magnética. Estes deslocamentos foram comprovados e mensurados praticamente, através de sensores de proximidade.

- as movimentações do eixo da unidade geradora, provenientes de alinhamento de mancais (run-out), são da ordem de centésimos de milímetro, e a unidade geradora que apresenta excentricidade no estator do gerador, ao ser energizada, sofre mudanças de centro que podem equivaler à folga diametral do mancal, que corresponde a valores da ordem de décimos de milímetro, jogando por terra toda a precisão utilizada no alinhamento.

Atualmente, o critério descrito acima, dirime algumas dúvidas relativas ao bom posicionamento da unidade geradora estaticamente, e consolida a utilização do centro geométrico do estator como o melhor posicionamento para o rotor do gerador, já que todas as intervenções de recentragem para este tipo de unidade geradora, que foram calcadas na distribuição de entreferro obtiveram bons resultados, que podem ser aprimorados, caso seja realizado um run-out para definição de um novo centro no mancal guia da turbina sem alteração do centro definido no mancal guia do gerador, que possibilite um alinhamento de mancais. Vale a pena lembrar que um novo posicionamento do mancal guia da turbina pode gerar problemas de origem hidráulica em face de alteração do centro de giro da turbina, tornando-se necessário portanto uma varredura atenta da operação da unidade em todas as condições de carga.

As intervenções realizadas nas unidades geradoras #6 e #1 da Usina de Furnas e Usina de Itumbiara respectivamente (detalhadas ao longo do artigo), foram muito úteis para embasamento deste critério, que já vinha sendo delineado nas diversas intervenções de centragem ocorridas, além de credenciarem a adoção da variância das concentricidades dos valores de entreferro como parâmetro para definição do melhor posicionamento para o centro geométrico do estator. Esta função estatística, utilizada para definição do melhor posicionamento do centro do rotor do gerador, obteve até o momento, sucesso em todas as suas aplicações, já que define através de uma planilha eletrônica alimentada com valores precisos de entreferro do gerador ou formato do estator, o posicionamento ideal do centro do eixo ao nível do rotor do gerador. Este posicionamento independe do valor e quantidade de pontos do estator com concentricidade acima dos limites especificados em norma (NBR13224).

A adoção deste procedimento matemático vem possibilitando a redução do custo e tempo de máquina parada para correção dos problemas acima descritos, com claros proveitos para a operação da unidade, traduzido pela redução da oscilação em operação,

obtida através de uma melhor condição de balanceamento. Este conceito vem permitindo o esclarecimento e solução de problemas ocorridos em unidades geradoras deste tipo, causados principalmente pela mudança acentuada de centro de giro, quando a unidade geradora fica submetida a esforços de origem elétrica.

Vale a pena lembrar que não é objetivo deste trabalho, definir novos rumos de centragem na montagem de hidrogeradores verticais, já muito bem definidos em normas, e que são certamente os mais corretos. Trata-se apenas de uma abordagem de manutenção para unidades deste tipo que apresentem problemas em operação e que atualmente em função das condições operacionais do sistema, a nosso ver, necessitam de intervenções eficientes, rápidas e criteriosas, no menor tempo e com o menor número de homens-hora.

#### 4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS SA. 2º Seminário de Manutenção Mecânica de Equipamentos Rotativos, Departamento de Equipamentos Rotativos, Junho/1990. Brasil.

(2) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Tolerância de montagem de unidades hidrelétricas verticais de grande porte - NBR 13224. Brasil.

(3) FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS SA. 6º Seminário de Manutenção Mecânica de Equipamentos Rotativos, Departamento de Equipamentos Rotativos, Outubro/2000. Brasil.