

# 1 Introdução

Vibração é o resultado da ação das forças dinâmicas sobre as máquinas. A vibração geralmente aparece em todas as máquinas devido ao movimento das partes que oscilam, giram ou se alternam. A vibração causa desgaste e fadiga, sendo freqüentemente responsável por quebras definitivas das máquinas.

O desbalanceamento de um rotor é um exemplo de como a vibração se origina. Um rotor com centro de massa no eixo de rotação, teoricamente, não vibra. Entretanto, se o centro de massa do rotor for ligeiramente excêntrico em relação ao eixo de rotação, ocorre vibração; o centro de massa move-se segundo uma trajetória circular com deslocamentos coordenados sendo um exemplo de movimento harmônico simples.

Geralmente, as vibrações que ocorrem nas máquinas e estruturas são indesejáveis, não somente por causa dos movimentos desagradáveis ou ruídos e tensões dinâmicas. Elas podem causar fadiga e conseqüente falha na estrutura ou nas peças que sofrem vibração mas, também acarretam perdas de energia e redução no desempenho que acompanham o elemento da fonte vibrante.

## 1.1 **Medição de oscilação em FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A.**

FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. atua há 49 anos nas áreas de geração, transmissão e comercialização de energia elétrica no Brasil. O sistema FURNAS possui 10 usinas hidroelétricas, totalizando 55 geradores hidroelétricos. A Empresa garante o fornecimento de energia elétrica em uma região onde estão situados 51% dos domicílios brasileiros e que responde por 65% do PIB brasileiro. De toda a energia consumida no Brasil, mais de 40% passa pelo sistema FURNAS. A empresa apresenta índices de confiabilidade em nível internacional de 99,99% e a disponibilidade operacional é de 92,47%. Todos os equipamentos de geração e transmissão do sistema FURNAS fazem parte de um programa de manutenção centrada em confiabilidade (MCC).

A medição de oscilação é feita em todo o sistema FURNAS de acordo com uma programação de manutenção. Para tanto, é usado um sensor indutivo de proximidade para medir a oscilação do eixo do gerador. O sensor é colocado no mancal guia superior do gerador, conforme a Fig. 1.

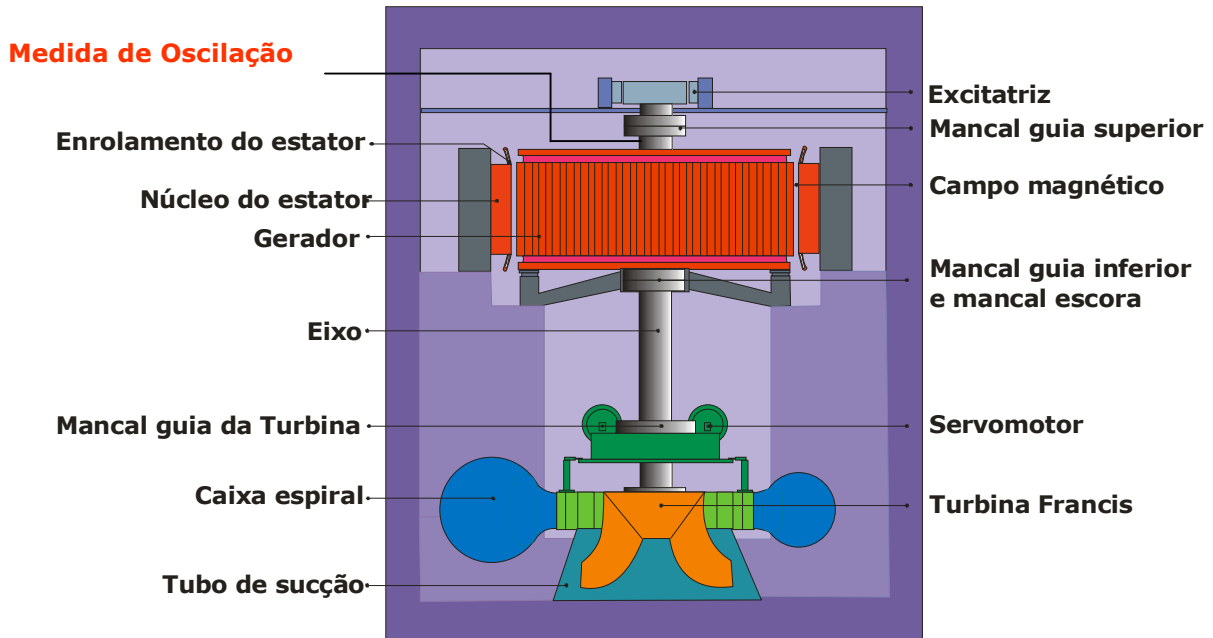


Figura 1 - Gerador e turbina hidroelétricas

### 1.1.1

#### Causas da oscilação

As normas VDI 2059 (1982) e ISO 7919-5 (1997) citam como possíveis causas da oscilação:

- Causa Mecânica: Alinhamento incorreto do eixo.
- Causa Elétrica: Desbalanceamento magnético.
- Causas Hidráulicas: Desequilíbrio hidráulico, cavitação.

### 1.1.2

#### Norma utilizada para determinar o limite da oscilação

Na medição da oscilação dos geradores, FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. utiliza a norma NEMA MG 5.2 (1972), que estabelece que a oscilação deve ter um valor máximo de 80% da folga diametral do mancal guia\*, sendo que a temperatura do mancal não deve ultrapassar 75 °C. A oscilação é medida com o gerador na rotação nominal. A norma NEMA MG 5.2 (1972) não faz referência à incerteza da medição da oscilação.

\* Folga diametral do mancal guia: Espaço existente entre o mancal e o eixo, cujo valor é definido pelo fabricante.

O valor máximo de oscilação dos geradores das usinas do sistema FURNAS varia de 0,12 mm a 0,80 mm, de acordo com a Tab. 1.

Tabela 1 - Folga diametral do mancal das usinas hidroelétricas

Usina	Folga diametral do mancal (fabricante)	Valor máximo de oscilação (Norma NEMA MG 5.2)
Usina de Corumbá	0,50 mm	0,40 mm
Usina de Funil	0,50 mm	0,40 mm
Usina de Furnas	0,40 mm	0,32 mm
	0,56 mm	0,45 mm
Usina de Itumbiara	1,00 mm	0,80 mm
Usina Luiz Carlos Barreto de Carvalho	0,24 mm	0,19 mm
Usina de Manso	0,15 mm	0,12 mm
Usina de Marimondo	0,20 mm	0,16 mm
Usina de Mascarenhas de Moraes	0,60 mm	0,48 mm
	0,46 mm	0,37 mm
	0,50 mm	0,40 mm
Usina de Porto Colômbia	0,20 mm	0,16 mm
Usina de Serra da Mesa	0,80 mm	0,64 mm

Analisando as normas citadas na bibliografia, a norma VDI 2059 (1982), fornece uma tabela deslocamento ( $S_{max}$ ) x rotação nominal (rpm\*), sendo a faixa de rotação nominal de 120 rpm a 3000 rpm. Portanto, esta norma não contempla valores abaixo de 120 rpm, tendo o sistema FURNAS vários geradores com rotações abaixo de 120 rpm.

A norma 7919-5 (1997), fornece uma tabela deslocamento ( $S_{max}$ ) x rotação nominal (rpm), abrangendo a faixa de rotação nominal de 60 rpm a 200 rpm, contemplando os geradores do sistema FURNAS. Porém, FURNAS utiliza a norma NEMA MG 5.2 (1972) por esta apresentar como limite de tolerância da oscilação, o valor de 80% da folga diametral do mancal guia.

---

\* No site: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/unidLegaisMed.asp>., no quadro: Algumas unidades em uso com o SI, sem restrição de prazo, cita a grandeza: velocidade angular, nome: rotação por minuto e símbolo: rpm.

### 1.1.3

#### Problemas causados pela oscilação acima do especificado

Caso a oscilação alcance valores acima do especificado, ocorrerá:

- queima ou arrastamento de mancal; a Fig. 2 mostra uma sapata do mancal da Usina de Mascarenhas de Moraes – USMM.O queimada.
- fadiga na estrutura do mancal;
- fadiga na estrutura do estator;
- fadiga na estrutura do rotor;
- roçamento do rotor.



Figura 2 - Sapata do mancal queimada

Estes problemas provocados por uma oscilação acima do especificado, além de causarem um prejuízo financeiro, colocam o sistema energético em risco, pois poderá ocorrer desligamento do gerador. Devido a isto, é imprescindível que os sensores utilizados na medição da oscilação dos geradores hidroelétricos sejam calibrados e a incerteza de medição determinada.

## 1.2 Objetivos

O objetivo desta dissertação é desenvolver uma metodologia de calibração de sensores de proximidade indutivos, contribuindo para uma melhor medição da oscilação em relação à que é atualmente realizada por FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., visando a uma maior confiabilidade metrológica dos dados a serem obtidos no processo da medição da oscilação.

Para se determinar se a calibração estática produz os mesmos resultados que a dinâmica, foram feitos testes comparando:

- ✓ Resultados da calibração estática de sensores de proximidade indutivos pelo método de FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. e pela metodologia proposta.
- ✓ Resultados da calibração dinâmica de sensores de proximidade indutivos nas frequências de 1,5 Hz, 2 Hz, 2,5 Hz e 3 Hz, que correspondem às rotações nominais dos geradores hidroelétricos de FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., verificando a influência da frequência sobre a calibração.
- ✓ Calibrações estática e dinâmica.

Analisando as normas citadas na bibliografia: VDI 2059 (1982), ISO 7919-5 (1997) e NEMA MG 5.2 (1972), estas não fazem referência ao método de calibração do sensor utilizado na medição da oscilação, muito menos indicam a metodologia do cálculo da incerteza de medição.

Com este trabalho, pretende-se contribuir com um procedimento de calibração dos sensores de proximidade indutivos e determinação da incerteza de medição, ainda não existentes nas normas disponíveis.