

## 2

# Medição da oscilação dos geradores hidroelétricos do sistema FURNAS

### 2.1

#### Vibração e oscilação

Vibração é o movimento oscilatório em torno de uma posição de referência. Um corpo é dito estar vibrando quando ele descreve um movimento de oscilação em torno de uma posição de referência.

Oscilar significa mover-se de um lado para outro, movimentar-se alternadamente em sentidos opostos, mover-se, tornando a passar (ao menos aproximadamente) pelas mesmas posições. Assim, uma partícula que se movimenta para frente e para trás ao redor de um ponto dado está em um movimento oscilatório. Periódico significa que o movimento se repete com intervalos regulares. Assim, uma partícula que se move de modo que, em intervalos de tempos iguais, o movimento se repete identicamente, está em um movimento periódico. Uma partícula que se move para frente e para trás, ao redor de um ponto fixo, e para a qual o movimento se repete identicamente em intervalos de tempo iguais, está em um movimento periódico oscilatório.

O movimento harmônico simples é um tipo particular de movimento periódico oscilatório em que a partícula se move sobre uma reta de modo que a intensidade da força que tende a levá-la ao ponto fixo cresce na mesma proporção em que aumenta o seu afastamento deste mesmo ponto fixo. O movimento harmônico simples pode ser visto como a projeção ortogonal do movimento circular uniforme sobre qualquer reta. Por exemplo, se uma partícula descreve um movimento circular uniforme em um plano vertical, a sombra da partícula descreve um movimento harmônico simples sobre uma linha horizontal.

Assim, inicialmente será formalizada matematicamente esta idéia do movimento harmônico simples como a projeção ortogonal de um movimento circular uniforme sobre qualquer reta. Se os pontos P e Q (Fig. 3) coincidem em  $t = 0$ , o ângulo do segmento OQ com o eixo X no instante posterior  $t$  é

$$\theta = \omega t, \quad (1)$$

onde  $\omega$  representa o módulo da velocidade angular do movimento circular uniforme.

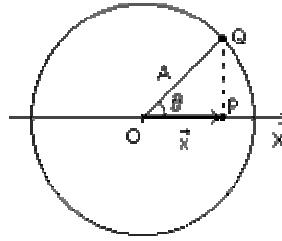


Figura 3 - Projeção ortogonal do movimento circular uniforme

$$\text{Então, } \cos \omega t = x/A, \quad (2)$$

$$\text{ou, } x(t) = A * \cos \omega t \quad (3)$$

onde  $x$  é a elongação,  $\omega$  é a frequência angular e  $A$  é a amplitude (elongação máxima) da partícula em movimento harmônico simples.

A vibração mecânica é um tipo de movimento, no qual se considera uma massa reduzida a um ponto ou partícula submetida a uma força. A ação de uma força sobre o ponto obriga-o a executar um movimento vibratório. No detalhe da Fig. 4, o ponto P, quando em repouso ou não estimulado pela força, localiza-se sobre o eixo  $x$ . Sendo estimulado por uma força, ele se moverá na direção do eixo  $y$ , entre duas posições limites, equidistantes de  $x$ , percorrendo a distância  $2D$ , denominada trajetória completa ou ciclo, conhecida pelo nome de período de oscilação.

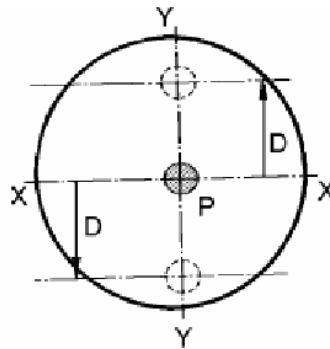


Figura 4 - Deslocamento do ponto P

O ponto P alcança seu valor máximo  $D$ , de um e do outro lado do eixo  $x$ . Esse valor máximo de deslocamento é chamado de amplitude de deslocamento.

O deslocamento do ponto P implica a existência de uma velocidade que poderá ser variável. O ponto P tem sua velocidade nula nas posições da amplitude máxima de deslocamento e velocidade máxima quando passa pelo eixo  $x$ , que é a posição intermediária de sua trajetória. Como a velocidade do ponto P varia no decorrer do tempo, fica definida uma certa aceleração para ele.

A aceleração do ponto P será nula sobre o eixo x, pois sobre ele o ponto P estará com velocidade máxima.

Considerando o exposto, as vibrações mecânicas podem ser medidas em valores de aceleração, velocidade, deslocamento e frequência.

## 2.2 Funcionamento do sensor indutivo de proximidade

O princípio do sensor empregado é indutivo, efetuando uma comutação eletrônica quando um objeto metálico penetra no seu campo eletromagnético, de alta frequência, gerado e direcionado para fora da face do sensor através de uma bobina e de um circuito ressonante. São chamados de indutivos porque uma bobina confeccionada em ferrite (amplificador de campo), e situada na face do sensor, induz um campo eletromagnético. A indutância da bobina é alterada por efeito da aproximação ou afastamento do objeto cuja proximidade se pretende detectar. O objeto quando penetra esse campo, distorce e amortece, conseqüentemente, ocorre sua comutação, modificando o seu sinal de saída. (Turck, 2006)

O diagrama em bloco da Fig. 5 ilustra as partes internas do sensor e a Fig. 6 mostra o circuito interno do sensor (Catálogo do fabricante TURCK).

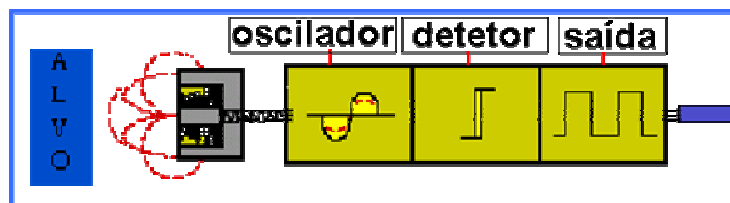


Figura 5 - Diagrama em bloco do sensor indutivo

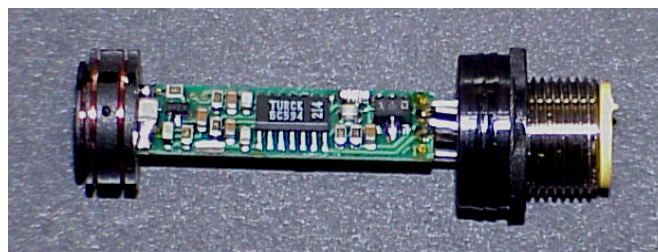


Figura 6 - Parte interna do sensor indutivo

Como os sensores indutivos usam o princípio de indução magnética, o material ideal a ser detectado será aquele que possuir uma boa capacidade de

conduzir um fluxo magnético; a essa capacidade de interagir com um campo magnético dá-se o nome de permeabilidade magnética e é representada por  $\mu$ . No vácuo a permeabilidade magnética é dada por:  $\mu_0 = 4.\pi.10^{-7}$  Wb/A.m. Em geral costuma-se comparar a permeabilidade magnética dos materiais com a do vácuo. A permeabilidade magnética relativa é um valor adimensional relativo ao material em questão:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad (4)$$

Um bom condutor magnético com alta permeabilidade magnética relativa interage melhor com o fluxo magnético do que um mau condutor magnético (baixa permeabilidade magnética relativa).

Classificação dos materiais quanto ao magnetismo:

- Materiais DIAMAGNÉTICOS são aqueles que apresentam uma permeabilidade magnética relativa menor que 1. Exemplo: ouro, prata, cobre, zinco, cristal, etc.

- Materiais PARAMAGNÉTICOS são aqueles que apresentam uma permeabilidade magnética relativa igual a 1. Exemplo: alumínio, magnésio, platina, etc.

- Materiais FERROMAGNÉTICOS são aqueles que apresentam uma permeabilidade magnética relativa maior que 1. Exemplo: ferro, níquel, cobalto, etc.

Considerando as informações anteriores, percebe-se que alguns materiais irão interagir melhor com o fluxo do campo magnético gerado pelo sensor. Define, portanto, um fator de permeabilidade magnética, que indica a capacidade de interação do material com o campo magnético. Pode-se observar na Tab. 2 alguns materiais e seus respectivos fatores.

Tabela 2 - Fator de permeabilidade magnética

MATERIAL	FATOR
FERRO/AÇO	1
CROMO	0,9
AÇO INOX	0,85
LATÃO	0,5
ALUMÍNIO	0,4
COBRE	0,3

Este fator é utilizado para calcular a distância efetiva de detecção, a partir da distância sensora,  $S_n$ , que é uma característica do sensor. Multiplicando-se  $S_n$  pelo fator de permeabilidade magnética, tem-se a distância real de detecção. Por exemplo, se o sensor tem  $S_n = 10\text{mm}$  e o material a ser detectado é uma placa de aço (material ferromagnético), a qual distância efetivamente o sensor irá detectar esse alvo? Deve-se calcular,  $S_n \times \text{fator} = 10\text{mm} \times 1 = 10\text{mm}$ , ou seja, o alvo será detectado a 10mm de distância. Se o material a ser detectado é uma placa de latão, deve-se calcular,  $S_n \times \text{fator} = 10\text{mm} \times 0,5 = 5\text{mm}$ , o alvo será detectado a 5mm de distância.

O sinal de saída do sensor indutivo é do tipo analógico, sendo um valor de tensão (0V a 10 V) proporcional à distância medida.

### 2.3

#### **Calibração do sensor – método utilizado em FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A.**

Previamente, os sensores indutivos de proximidade foram submetidos a uma calibração estática. Estes sensores utilizados na medição da oscilação dos geradores foram calibrados com o auxílio de um relógio comparador. Foi utilizado um dispositivo que possui uma base e uma parte móvel onde está fixada uma chapa de aço. O relógio comparador e o sensor foram fixados na base e encostou-se a chapa de aço (parte móvel) no sensor e no relógio comparador (Fig. 7).

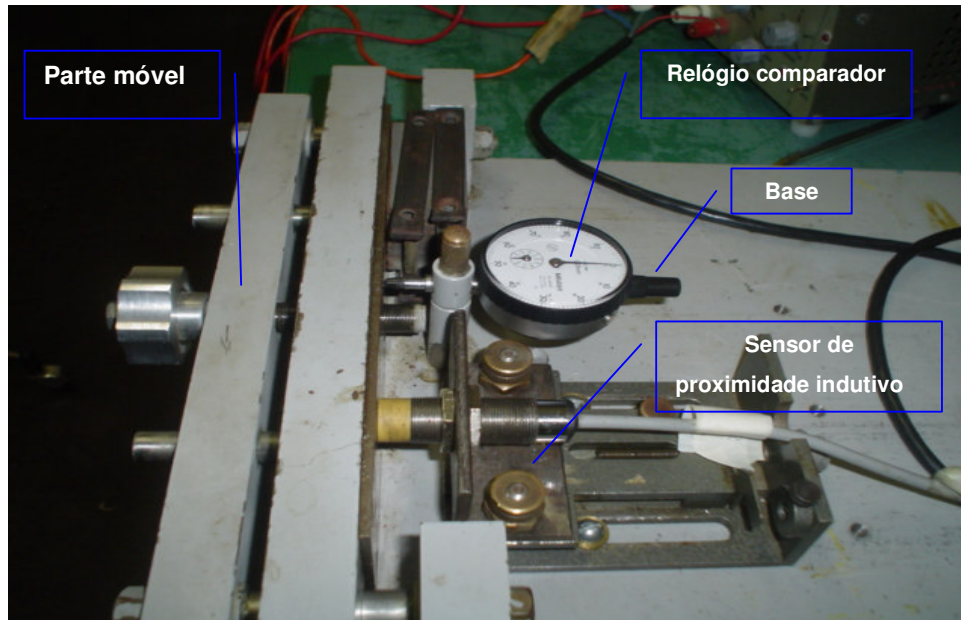


Figura 7 - Calibração estática do sensor indutivo – método FURNAS

✓ O relógio comparador foi zerado e foi movimentada a chapa de aço (parte móvel), sendo medidos o valor do deslocamento (mm) com o relógio comparador e o valor de tensão do sensor com o voltímetro. Esse processo foi feito em, no mínimo, cinco (5) valores crescentes e decrescentes de deslocamento, abrangendo a faixa de operação do sensor indutivo. Com estes dados da medição, foi ajustada, através do método dos mínimos quadrados, uma curva de calibração de deslocamento do sensor (polinômio de 1º grau), a qual será apresentada no capítulo 4, seção 4.1. Esta equação foi utilizada nas medidas feitas com o sensor de proximidade na medição da oscilação dos geradores.

Durante o processo de calibração, foram tomados cuidados para que a folga do mecanismo móvel não introduzisse erros na leitura.

Apesar de que o sensor seja usado em medições com comportamento dinâmico, nenhum estudo havia sido feito para determinar se a calibração estática é aplicável para medições dinâmicas. Além disso, atualmente em FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., o procedimento de calibração do sensor indutivo não inclui cálculo da incerteza de calibração e não há uma periodicidade na calibração do relógio comparador e nem dos sensores indutivos de proximidade.

## 2.4 Medição da oscilação nos geradores

Nas usinas hidroelétricas, são utilizados os seguintes equipamentos na medição da oscilação dos geradores (Figuras 8 e 9):

- sensor de proximidade indutivo, fabricante.: Turck, modelo.: Ni8-M18-LIU, faixa: 1 mm a 5 mm, exatidão: 1% da faixa;
- fonte de tensão cc, fabricante: CTE.O/FURNAS, faixa: 20 V;
- oscilógrafo, fabricante: Yokogawa, modelo.: DL750; exatidão:  $\pm 0,005\%$ .

O sensor indutivo de proximidade é montado próximo ao eixo do gerador no mancal guia superior, de acordo com a Fig. 8.

Os parâmetros da equação obtidos na comparação com o relógio comparador são introduzidos no oscilógrafo e as medições da oscilação são obtidas nas seguintes condições: mecânica (gerador sujeito aos esforços mecânicos), excitada (tensão nominal aplicada ao gerador, gerador submetido aos esforços mecânicos e a força magnética) e com carga (corrente nominal circulando no estator, gerador submetido aos esforços mecânicos, a força magnética e as variações de carga). As Figuras 8 e 9 mostram a montagem e os equipamentos utilizados na medição da oscilação da unidade geradora 06 da Usina de Marimbondo – USMR.O.



Figura 8 - Montagem do sensor indutivo para medição da oscilação



Figura 9 - Equipamentos utilizados na medição da oscilação