

3 Procedimento Experimental

O experimento foi realizado no Centro Técnico de Ensaios e Medições – CTE.O de FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., utilizando os seguintes equipamentos:

- ✓ Sensores de proximidade indutivos(objetos do experimento) (Fig. 10):
 - Sensor indutivo, fabricante: Turck, modelo: Ni8-M18-LIU, faixa: 1 mm a 5 mm, exatidão: 1% da faixa (Sensor 1), tensão de operação: 15 V a 30 V;
 - Sensor indutivo, fabricante: Turck, modelo: Bi5-M18-LIU-1141, faixa: 2 mm a 4 mm, exatidão: 1% da faixa (Sensor 2), tensão de operação: 15 V a 30 V;



Figura 10 - Sensores indutivos

- ✓ Fonte para alimentação dos sensores de proximidade indutivos:
 - Fonte de tensão cc, fabricante: CTE.O, NP: 355-2-23804, faixa: ± 20 V;
- ✓ Medidor de tensão e freqüência dos sensores de proximidade indutivos (Fig. 11):
 - Analisador de sinal, fabricante: HP, modelo: 35670A, NP: 355-2-26771, exatidão (tensão): 0,025%, exatidão (freqüência): 0,003%;



Figura 11 - Analisador de sinal

- ✓ Sistema utilizado na calibração estática e dinâmica:
 - Giga de teste;
- ✓ Medidor do deslocamento da giga de teste (Fig. 12):
 - Relógio comparador analógico, fabricante: Mitutoyo, modelo: 2046F, série: 7A5917, NP: 354-3-17264, faixa: 10 mm, resolução: 0,01 mm;



Figura 12 - Relógio comparador

- ✓ Medidor das condições ambientais:
 - Termohigrômetro, fabricante: Instrutherm, modelo: 463, NP: 355-1-5722, faixa: 0 °C a 100 °C e 0% a 100%;
- ✓ Manipulação das grandezas medidas e cálculos:
 - Microcomputador.

3.1 Calibração estática da giga de teste

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizada a giga de teste, um sistema composto por um motor com velocidade variável e tendo acoplado a seu eixo um disco com excentricidade variável e controlada. Durante o procedimento experimental foram confeccionados alguns discos (Fig. 13), na tentativa de obter resultados que refletissem o comportamento do sensor de proximidade indutivo nas condições estática e dinâmica. Porém, não foram satisfatórios os resultados encontrados. Decidiu-se usar a giga de teste com o disco original, calibrando-a estaticamente e determinando a curva de calibração.



Figura 13 - Discos confeccionados para o procedimento experimental

Ajustada a giga de teste para o menor deslocamento possível e medido o deslocamento nas condições estática e dinâmica com o relógio comparador, foi obtido o mesmo valor para as duas condições. O valor máximo do deslocamento da giga de teste foi de 0,01 mm. Para valores mais elevados de deslocamento, por impossibilidade experimental de medi-los na condição dinâmica, foi suposto que o comportamento da giga de teste era o mesmo que para deslocamentos menores.

3.1.1

Procedimento de calibração estática da giga de teste

O procedimento para a calibração estática da giga de teste foi constituído pelos seguintes passos:

- ✓ Ajuste da excentricidade do disco (Fig. 14), de modo que o deslocamento mínimo fosse 0 mm e o deslocamento máximo fosse 1,98 mm.



Figura 14 - Detalhe do ajuste da excentricidade do disco

✓ Medição com o relógio comparador do deslocamento do disco em cada um dos treze pontos previamente marcados (Fig. 15). Estes pontos foram marcados no disco de 30° em 30° , tendo a posição 0° coincidido com 0 mm de deslocamento e 180° com 1,98 mm de deslocamento.



Figura 15 - Calibração estática da giga de teste

✓ A partir das medidas, obtenção da curva de calibração de deslocamento da giga de teste:

$$\text{deslocamento} = A - B \cos \theta \quad (5)$$

onde:

$$A = \frac{\text{deslocamentomáximo} + \text{deslocamentomínimo}}{2} \quad (6)$$

$$B = \frac{\text{deslocamentomáximo} - \text{deslocamentomínimo}}{2} \quad (7)$$

Ou seja,

$$\text{deslocamento} = 0,99 - 0,99 \cos \theta \quad (8)$$

A Tab. 3 relaciona os valores medidos do deslocamento da giga de teste nas diversas posições e a Fig. 16 o gráfico da posição x deslocamento.

Tabela 3 - Curva de calibração de deslocamento da giga de teste

Posição (graus)	Valores Medidos Deslocamento (mm)	Valores Calculados Deslocamento (mm)	Ajuste (mm)
0	0	0,000	0,000
30	0,11	0,133	-0,023
60	0,46	0,495	-0,035
90	0,95	0,990	-0,040
120	1,45	1,485	-0,035
150	1,82	1,847	-0,027
180	1,98	1,980	0,000
210	1,87	1,847	0,023
240	1,53	1,485	0,045
270	1,05	0,990	0,060
300	0,5	0,495	0,005
330	0,16	0,133	0,027
360	0	0,000	0,000

$$\text{deslocamento} = 0,99 - 0,99 \cos \theta$$

$$\cos 0^\circ = 1 \quad 0 \text{ mm}$$

$$\cos 180^\circ = -1 \quad 1,98 \text{ mm}$$

$$\cos 360^\circ = 1 \quad 0 \text{ mm}$$

$$\text{máx. deslocamento} = A + B$$

$$\text{min. deslocamento} = A - B$$

$$\text{máx. deslocamento} = 1,98$$

$$\text{min. deslocamento} = 0,00$$

$$A = 0,99$$

$$B = 0,99$$

Desvio Médio Quadrático	0,033
-------------------------	--------------

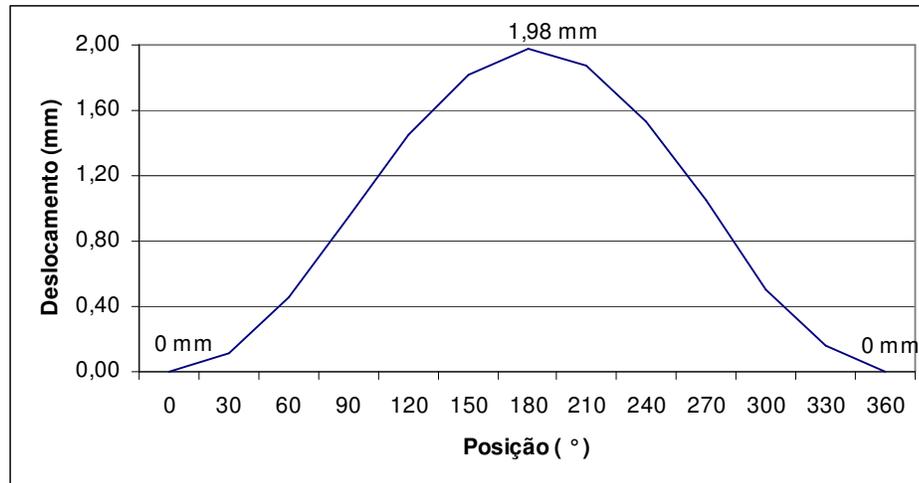


Figura 16 – Gráfico da posição x deslocamento

- ✓ Determinação da incerteza expandida do deslocamento da giga de teste.

A incerteza combinada do deslocamento da giga de teste é a soma das seguintes incertezas:

- incerteza padrão do relógio comparador (Tipo B): $(u_{relógio})$
- incerteza padrão do ajuste da curva de calibração (Tipo A): (u_{ajuste})
- incerteza padrão da posição do relógio comparador (Tipo B):

$$\left(u_{graus} * \frac{\partial desloc}{\partial \theta} \right)$$

$$(u_{desloc})^2 = (u_{relógio})^2 + (u_{ajuste})^2 + \left(u_{graus} * \frac{\partial desloc}{\partial \theta} \right)^2 \quad (9)$$

A incerteza expandida do deslocamento da giga de teste é:

$$U_{desloc} = t_{student} * u_{desloc} \quad (10)$$

A Tab. 4 relaciona a curva de calibração de deslocamento, a incerteza expandida e as diversas incertezas consideradas.

Tabela 4 - Curva de calibração e incertezas (giga de teste)

Curva de calibração	$deslocamento = 0,99 - 0,99 \cos \theta$
U_{desloc}	$\pm 0,068 \text{ mm}$

$u_{relógio}$	0,0060 mm
u_{ajuste}	0,033 mm
$u_{graus} * \frac{\partial_{desloc}}{\partial_{\theta}}$	0,0050 mm
u_{desloc}	$\pm 0,034 mm$

3.2 Calibração estática do sensor de proximidade indutivo

Na calibração, devido às características do sensor indutivo, tomou-se o cuidado de que o material do dispositivo (disco da giga de teste) detectado pelo sensor fosse aço, ou seja, o mesmo material dos eixos dos geradores do sistema FURNAS.

3.2.1 Procedimento de calibração estática do sensor de proximidade indutivo

O procedimento para a calibração estática do sensor de proximidade indutivo foi constituído pelos seguintes passos:

- ✓ Medição com o relógio comparador de um afastamento de 2 mm da posição 0°, sendo então fixado o sensor de proximidade indutivo (Fig. 17).

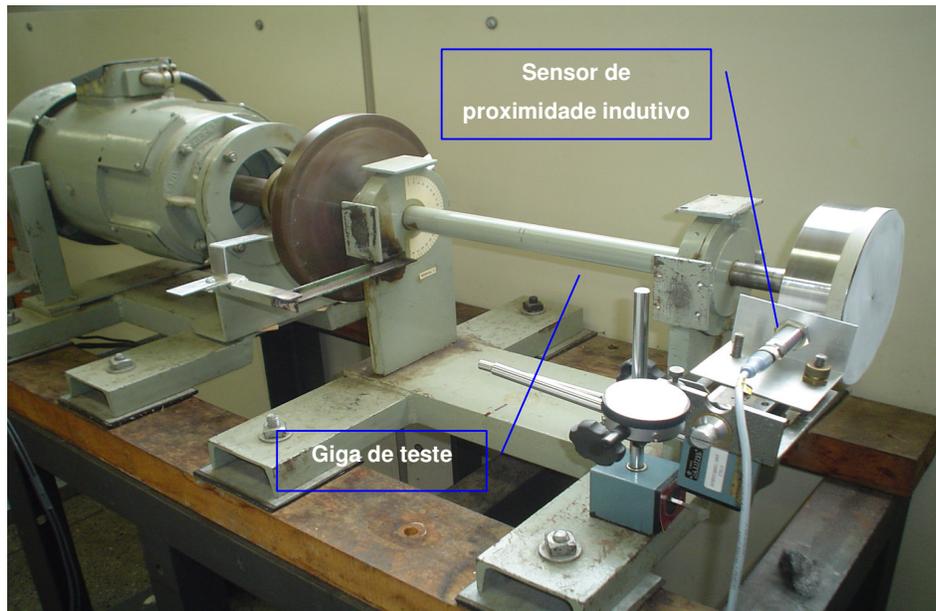


Figura 17 - Calibração estática do sensor indutivo - método proposto

✓ Medição do valor da tensão de saída do sensor com o analisador de sinal, sendo em seguida movimentado manualmente o eixo, sempre posicionando o sensor à frente de cada um dos pontos, obtendo-se os valores de tensão para os treze pontos.

✓ Gravação das medidas em disquete, transferência para o computador e manipulação com o software HP 35639A Data Viewer.

✓ Com as medidas obtidas, cálculo da curva de calibração de tensão do sensor indutivo:

$$\text{tensão} = A - B \cos \theta \quad (11)$$

onde:

$$A = \frac{\text{tensãomáxima} + \text{tensãomínima}}{2} \quad (12)$$

$$B = \frac{\text{tensãomáxima} - \text{tensãomínima}}{2} \quad (13)$$

Ou seja,

$$\text{Sensor 1 : tensão} = 5,1270 - 2,6991 \cos \theta \quad (14)$$

$$\text{Sensor 2 : tensão} = 5,2031 - 4,6794 \cos \theta \quad (15)$$

As Tabelas 5 e 6 relacionam os valores medidos das tensões dos sensores 1 e 2 nas diversas posições e as Figuras 18 e 19 apresentam o gráfico posição x deslocamento dos sensores 1 e 2.

Tabela 5 - Curva de calibração de tensão do sensor 1

Sensor 1 (1 a 5 mm)				$\text{tensão} = 5,1270 - 2,6991 \cos \theta$	
Posição (graus)	Tensão Medida V	Tensão Calculada V	Ajuste V		
0	2,4562	2,4279	0,028	$\cos 0^\circ = 1$	2,4279
30	2,8118	2,7895	0,022	$\cos 180^\circ = -1$	7,8261
60	3,7616	3,7775	-0,016	$\cos 360^\circ = 1$	2,4279
90	5,1765	5,1270	0,049	tensão máxima =	A + B
120	6,6068	6,4766	0,130	tensão mínima =	A - B
150	7,5145	7,4645	0,050	tensão máxima =	7,8261
180	7,8261	7,8261	0,000	tensão mínima =	2,4279
210	7,5442	7,4645	0,080	A =	5,1270
240	6,7236	6,4766	0,247	B =	2,6991
270	5,3328	5,1270	0,206		
300	3,9163	3,7775	0,139		
330	2,7602	2,7895	-0,029		
360	2,4279	2,4279	0,000		
Desvio Médio Quadrático			0,118		

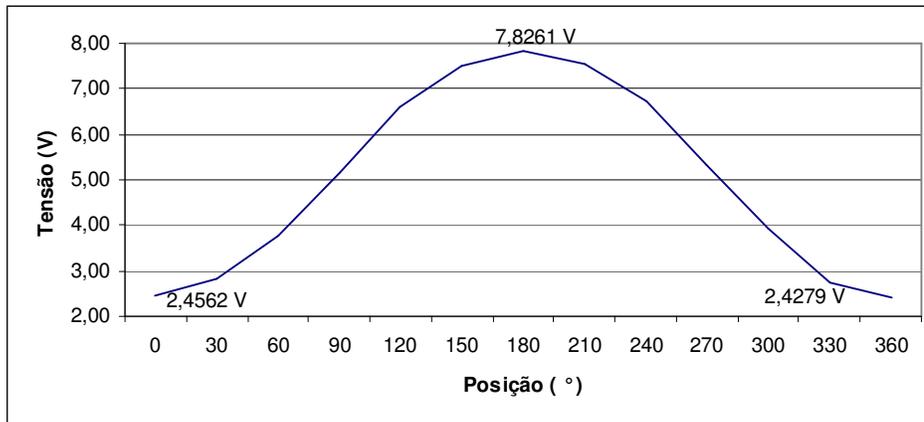


Figura 18 – Gráfico posição x deslocamento do sensor 1

Tabela 6 - Curva de calibração de tensão do sensor 2

Sensor 2 (2 a 4 mm)				$tensão = 5,2031 - 4,6794 \cos \theta$	
Posição (graus)	Tensão Medida (V)	Tensão Calculada (V)	Ajuste (V)		
0	0,5662	0,5237	0,043	$\cos 0^\circ = 1$	0,5237
30	1,2321	1,1506	0,082	$\cos 180^\circ = -1$	9,8825
60	3,0474	2,8634	0,184	$\cos 360^\circ = 1$	0,5237
90	5,6022	5,2031	0,399	tensão máxima =	A + B
120	7,8940	7,5428	0,351	tensão mínima =	A - B
150	9,3935	9,2556	0,138	tensão máxima =	9,8825
180	9,8825	9,8825	0,000	tensão mínima =	0,5237
210	9,3841	9,2556	0,129	A =	5,2031
240	7,9979	7,5428	0,455	B =	4,6794
270	5,5681	5,2031	0,365		
300	3,1197	2,8634	0,256		
330	1,1465	1,1506	-0,004		
360	0,5237	0,5237	0,000		
Desvio Médio Quadrático			0,264		

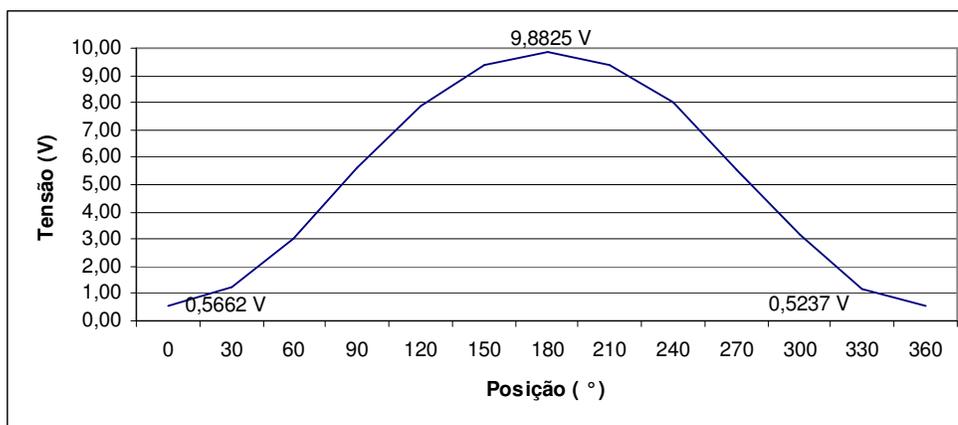


Figura 19 – Gráfico posição x deslocamento do sensor 2

✓ Determinação da incerteza expandida da tensão de saída do sensor indutivo:

A incerteza combinada de tensão é a soma das incertezas:

- incerteza padrão do analisador de sinal (Tipo B): ($u_{\text{analisador}}$)

$u_{\text{analisador}}$ = incerteza padrão de tensão (u_{Vcal}) + incerteza padrão da repetitividade (u_{rep})

- incerteza padrão do ajuste da curva de calibração (Tipo A): (u_{ajuste})

- incerteza padrão da posição do sensor indutivo (Tipo B): ($u_{\text{graus}} * \frac{\partial V}{\partial \theta}$)

$$(u_{\text{tensão}})^2 = (u_{\text{analisador}})^2 + (u_{\text{ajuste}})^2 + (u_{\text{graus}} * \frac{\partial V}{\partial \theta})^2 \quad (16)$$

A incerteza expandida da tensão de saída do sensor indutivo é:

$$U_{\text{tensão}} = t_{\text{student}} * u_{\text{tensão}} \quad (17)$$

A Tab. 7 relaciona as curvas de calibração de tensão dos sensores 1 e 2, as incertezas expandidas e as diversas incertezas consideradas.

Tabela 7 - Curvas de calibração de tensão e incertezas

	Sensor 1	Sensor 2
Curva de calibração	$tensão = 5,1270 - 2,6991 \cos \theta$	$tensão = 5,2031 - 4,6794 \cos \theta$
$U_{\text{tensão}}$	$\pm 0,24 \text{ V}$	$\pm 0,53 \text{ V}$
$u_{\text{analisador}}$	0,0043 V	0,0043 V
u_{ajuste}	0,118 V	0,264 V
$u_{\text{graus}} * \frac{\partial V}{\partial \theta}$	0,014 V	0,024 V
$u_{\text{tensão}}$	$\pm 0,120 \text{ V}$	$\pm 0,265 \text{ V}$

✓ Com os valores medidos do deslocamento da giga de teste (mm) e os valores medidos de tensão do sensor (V), ajuste pelo método dos mínimos quadrados da curva de calibração de deslocamento do sensor indutivo:

$$\text{deslocamento} = Ax^2 + Bx + C \quad (18)$$

onde:

x = tensão medida pelo sensor indutivo;

A, B e C = coeficientes do polinômio.

$$\text{Sensor 1: } \text{deslocamento} = 0,0063V^2 + 0,2983V - 0,7551 \quad (19)$$

$$\text{Sensor 2: } \text{deslocamento} = 0,0035V^2 + 0,1729V - 0,0854 \quad (20)$$

A Fig. 20 apresenta a curva de calibração de deslocamento do sensor 1 determinada na calibração estática (tensão do sensor 1 x deslocamento da giga de teste).

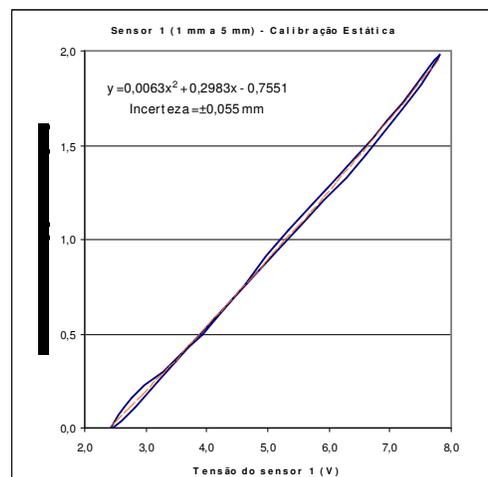


Figura 20 - Curva de calibração de deslocamento do sensor 1

A Tab. 8 relaciona os valores medidos do deslocamento da giga de teste e os valores medidos de tensão do sensor 1.

Tabela 8 - Curva de calibração de deslocamento do sensor 1

Sensor 1 (1mm a 5 mm)		deslocamento = $0,0063x^2 + 0,2983x - 0,7551$		
Posição	Tensão	Deslocamento	Deslocamento	Ajuste
(graus)	(Sensor 1)	(Giga de Teste)	Calculado	
	(V)	(mm)	(mm)	(mm)
0	2,4562	0,00	0,016	-0,016
30	2,8118	0,11	0,133	-0,023
60	3,7616	0,46	0,456	0,004
90	5,1765	0,95	0,958	-0,008
120	6,6068	1,45	1,491	-0,041
150	7,5145	1,82	1,842	-0,022
180	7,8261	1,98	1,965	0,015
210	7,5442	1,87	1,854	0,016
240	6,7236	1,53	1,535	-0,005
270	5,3328	1,05	1,015	0,035
300	3,9163	0,50	0,510	-0,010
330	2,7602	0,16	0,116	0,044
360	2,4279	0,00	0,006	-0,006
Desvio Médio Quadrático				0,0261

A Fig. 21 apresenta a curva de calibração de deslocamento do sensor 2 determinada na calibração estática (tensão do sensor 2 x deslocamento da giga de teste).

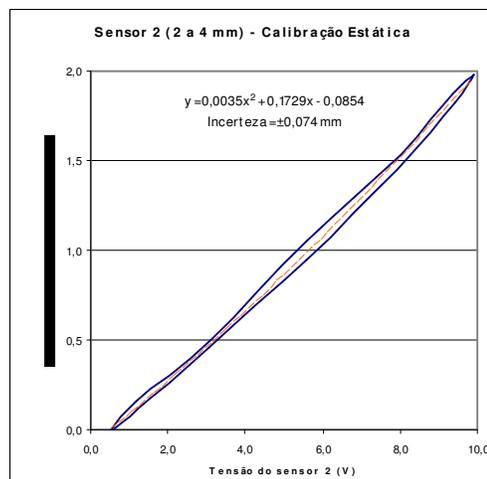


Figura 21 - Curva de calibração de deslocamento do sensor 2

A Tab. 9 relaciona os valores medidos do deslocamento da giga de teste e os valores medidos de tensão do sensor 2.

Tabela 9 - Curva de calibração de deslocamento do sensor 2

Sensor 2 (2 mm a 4 mm)		deslocamento = $0,0035x^2 + 0,1729x - 0,0854$		
Posição	Tensão	Deslocamento	Deslocamento	Ajuste
(graus)	(Sensor 2)	(Giga de Teste)	Calculado	
	(V)	(mm)	(mm)	(mm)
0	0,5662	0,00	0,014	-0,014
30	1,2321	0,11	0,133	-0,023
60	3,0474	0,46	0,474	-0,014
90	5,6022	0,95	0,993	-0,043
120	7,8940	1,45	1,498	-0,048
150	9,3935	1,82	1,848	-0,028
180	9,8825	1,98	1,965	0,015
210	9,3841	1,87	1,845	0,025
240	7,9979	1,53	1,521	0,009
270	5,5681	1,05	0,986	0,064
300	3,1197	0,50	0,488	0,012
330	1,1465	0,16	0,117	0,043
360	0,5237	0,00	0,006	-0,006
Desvio Médio Quadrático				0,0358

✓ Com os valores medidos do deslocamento da giga de teste (mm) e os valores medidos de tensão do sensor (V), determinação da incerteza expandida para o deslocamento medido pelo sensor indutivo:

A incerteza combinada do deslocamento é a soma das incertezas:

- incerteza padrão do relógio comparador (Tipo B): ($u_{relógio}$)
- incerteza padrão do ajuste da curva de calibração (Tipo A): (u_{ajuste})
- incerteza padrão da posição do relógio comparador (Tipo B):

$$(u_{graus} * \frac{\partial_{desloc}}{\partial_{\theta}})$$

- incerteza padrão do analisador de sinal (Tipo B): ($u_{analisador}$)

$$u_{analisador} = \text{incerteza padrão de tensão } (u_{V_{cal}}) + \text{incerteza padrão da repetitividade } (u_{rep})$$

- incerteza padrão da posição do sensor indutivo (Tipo B): ($u_{graus} * \frac{\partial_{V}}{\partial_{\theta}}$)

- coeficiente de sensibilidade (C_i): ($\frac{\partial_{desloc}}{\partial_{V}}$)

$$(u_{deslocamentoestática})^2 = (u_{relógio})^2 + (u_{ajuste})^2 + (u_{graus} * \frac{\partial_{desloc}}{\partial_{\theta}})^2 + \\ + [(u_{analisador})^2 + (u_{graus} * \frac{\partial_{V}}{\partial_{\theta}})^2] * (C_i)^2 \quad (21)$$

A incerteza expandida do deslocamento é:

$$U_{deslocamentoestática} = t_{student} * u_{cdeslocamentoestática} \quad (22)$$

A Tab. 10 relaciona as curvas de calibração de deslocamento, as incertezas expandidas e as diversas incertezas consideradas.

Tabela 10 - Curvas de calibração de deslocamento e incertezas

	Sensor 1	Sensor 2
Curva de calibração	$0,0063 V^2 + 0,2983 V - 0,7551$	$0,0035 V^2 + 0,1729 V - 0,0854$
$U_{deslocamentoestática}$	$\pm 0,055$ mm	$\pm 0,074$ mm
$u_{relógio}$	0,0060 mm	0,0060 mm
u_{ajuste}	0,026 mm	0,036 mm
$u_{graus} * \frac{\partial_{desloc}}{\partial_{\theta}}$	0,0050 mm	0,0050 mm
$u_{analisador}$	0,0048 V	0,0043 V
$u_{graus} * \frac{\partial_V}{\partial_{\theta}}$	0,014 V	0,024 V
$\frac{\partial_{desloc}}{\partial_V}$	0,311 mm/V	0,18 mm/V
$u_{deslocamentoestática}$	$\pm 0,0276$ mm	$\pm 0,037$ mm

3.3

Calibração dinâmica do sensor de proximidade indutivo

Dividindo-se as rotações nominais dos geradores hidroelétricos do sistema FURNAS (rpm) por 60, a Tab. 11 apresenta os valores respectivos de frequência em Hz. Julgou-se que os valores de 1,5 Hz, 2 Hz, 2,5 Hz e 3 Hz poderiam abranger as condições de operação das usinas, sendo estas as frequências utilizadas durante os experimentos para calibração dinâmica.

Tabela 11 - Rotação nominal das usinas hidroelétricas

Usina	Rotação nominal	Frequência
Usina de Corumbá	150 rpm	2,5 Hz
Usina de Funil	163,6 rpm	2,7 Hz
Usina de Furnas	150 rpm	2,5 Hz
Usina de Itumbiara	94,7 rpm	1,6 Hz
Usina Luiz Carlos Barreto de Carvalho	112,5 rpm	1,9 Hz
Usina de Manso	180 rpm	3 Hz
Usina de Marimbondo	100 rpm	1,7 Hz
Usina de Mascarenhas de Moraes	128,6 rpm	2,1 Hz
	138,5 rpm	2,3 Hz
Usina de Porto Colômbia	85,7 rpm	1,4 Hz
Usina de Serra da Mesa	120 rpm	2 Hz

3.3.1

Procedimento de calibração dinâmica do sensor de proximidade indutivo

O procedimento para a calibração dinâmica foi constituído pelos seguintes passos:

- ✓ Medição com o relógio comparador de um afastamento de 2 mm da posição 0°, sendo fixado o sensor de proximidade indutivo (Fig. 22).

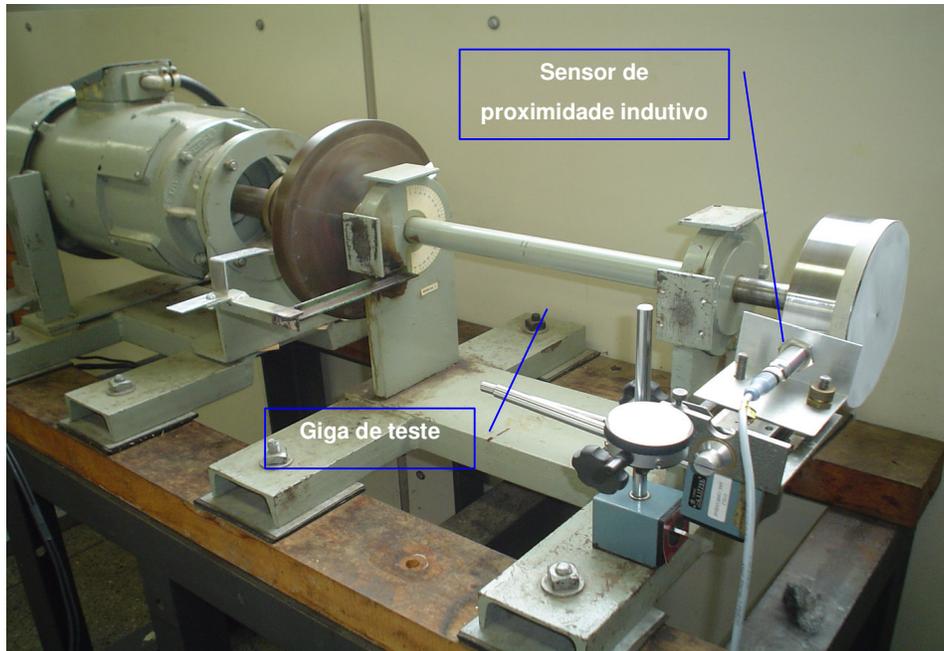


Figura 22 - Calibração dinâmica do sensor indutivo - método proposto

- ✓ Colocação em rotação da giga de teste, sendo esta estabilizada nas frequências correspondentes às rotações nominais dos geradores hidroelétricos de FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., ou seja, 1,5 Hz, 2 Hz, 2,5 Hz e 3 Hz.
- ✓ Medição com o analisador de sinal dos valores das frequências e das tensões do sensor.
- ✓ Graação das medidas em disquete, transferência para o microcomputador e manipulação com o software HP 35639A Data Viewer.
- ✓ Com as medidas obtidas, determinação da curva de calibração de deslocamento do sensor indutivo e a incerteza da medição.

Apresenta-se a seguir um exemplo do exposto acima: calibração do sensor 1 na frequência de 1,5 Hz.

- ✓ Medição com o analisador de sinal da frequência de rotação do sistema de medição, garantindo a frequência de 1,5 Hz na calibração do sensor 1 (Fig. 23).

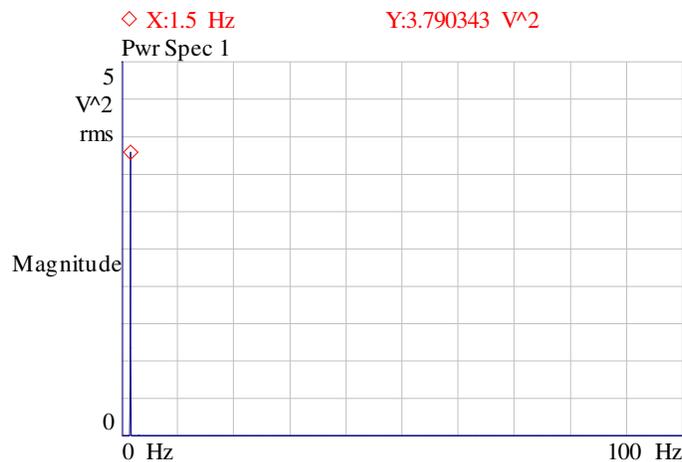


Figura 23 - Frequência de 1,5 Hz do sensor 1.

✓ Medição com o analisador de sinal do deslocamento do sensor 1 na frequência de 1,5 Hz (Fig. 24).

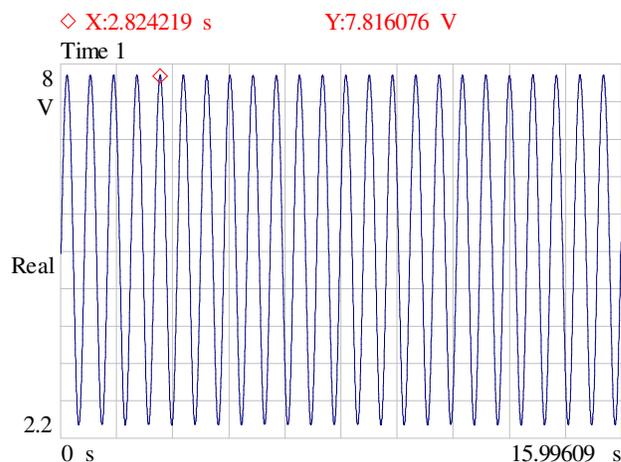


Figura 24 – Deslocamento do sensor 1

✓ Com o software HP 35639A Data Viewer, transformação dos valores do gráfico tensão x tempo em dados relacionados (Apêndice A - Tab. 38).

✓ Separação em ciclos: o primeiro ciclo tem início no primeiro valor mínimo de tensão, passando por um valor máximo de tensão e terminando no próximo valor mínimo de tensão.

✓ Separação desses valores de tensão e ds respectivos instantes de tempo.

✓ Na seqüência, o segundo ciclo tem início no último valor de tensão do primeiro ciclo, passando por um valor máximo e terminando no próximo valor mínimo de tensão.

- ✓ Separação dos ciclos até o final dos valores de tensão e tempo. Foram obtidos 23 ciclos, na frequência de 1,5 Hz, com um tempo de aquisição de 16 s.
- ✓ Para as demais frequências, manteve-se a obtenção de 23 ciclos.
- ✓ O analisador de sinal indica a frequência média dos 23 ciclos; para redução da incerteza no procedimento de calibração dinâmica foi calculada a frequência de cada ciclo.
- ✓ No apêndice A, a Tab. 38 relaciona uma parte dos valores de tempo e tensão medidos com o analisador, sendo que os valores em negrito representam o primeiro ciclo.
- ✓ Cálculo para o ciclo 1 da frequência do ciclo (Tab. 12):

$$\text{frequência do ciclo: } (f = \frac{1}{t_{\text{final}} - t_{\text{inicial}}}) \quad (23)$$

Tabela 12 - Frequência do ciclo 1

Ciclo 1	
Frequência (f) (Hz)	
$f = 1/(t_{\text{final}} - t_{\text{inicial}})$	
1,4971	
tempo (s)	
t ₁	0,5000
t ₂	0,5039
t ₃	0,5078
t ₄	0,5117
t ₅	0,5156
t ₆	0,5195
t ₇	0,5234
t ₈	0,5273
⋮	⋮
t ₁₇₂	1,1680

- ✓ Cálculo da frequência angular do ciclo (Tab. 13):

$$\omega = 2\pi f \quad (24)$$

Tabela 13 - Frequência angular do ciclo 1

Ciclo 1	
Frequência (f) (Hz)	Frequência Angular (ω) (rad/s)
$f = 1/(t_{\text{final}} - t_{\text{inicial}})$	$\omega = 2\pi f$
1,4971	9,4064

✓ Cálculo do ângulo θ_i correspondente a cada instante de tempo (t_i) em radianos.

$$\theta_i = \omega t \quad (25)$$

✓ Cálculo do ângulo θ_1 para t_1 , fazendo este o ângulo de ajuste.

✓ Ajuste dos dados, de maneira que o ciclo 1 inicie em 0° e termine em 360° .

✓ Ajuste do ângulo, de modo que $\theta_1 = 0$ rad:

$$\theta_1 = \theta_1 - \theta_{\text{ajuste}} \quad (26)$$

✓ Para todos os tempos (t_i), cálculo do ângulo θ_i e subtração de θ_{ajuste} .

✓ Ajuste para todos os pontos, obtendo para cada tempo (t_i) um valor de θ_i e $\cos \theta_i$ (Tab. 14).

Tabela 14 - Cálculo do ângulo (θ) para cada tempo (t) do ciclo 1

Ciclo 1					
	Frequência (f) (Hz)	Frequência Angular (ω) (rad/s)	θ_{ajuste}		
	$f = 1/(t_{\text{final}} - t_{\text{inicial}})$	$\omega = 2 \pi f$	$\theta_{\text{ajuste}} = \omega * t_1$		
	1,4971	9,4064	4,7032		
	tempo (s)		ângulo (rad)		
t_1	0,5000	$\theta_1 = \omega * t_1 - \theta_{\text{ajuste}}$	0,000	$\cos \theta_1$	1,000
t_2	0,5039	$\theta_2 = \omega * t_2 - \theta_{\text{ajuste}}$	0,037	$\cos \theta_2$	0,999
t_3	0,5078	$\theta_3 = \omega * t_3 - \theta_{\text{ajuste}}$	0,073	$\cos \theta_3$	0,997
t_4	0,5117	$\theta_4 = \omega * t_4 - \theta_{\text{ajuste}}$	0,110	$\cos \theta_4$	0,994
t_5	0,5156	$\theta_5 = \omega * t_5 - \theta_{\text{ajuste}}$	0,147	$\cos \theta_5$	0,989
t_6	0,5195	$\theta_6 = \omega * t_6 - \theta_{\text{ajuste}}$	0,184	$\cos \theta_6$	0,983
t_7	0,5234	$\theta_7 = \omega * t_7 - \theta_{\text{ajuste}}$	0,220	$\cos \theta_7$	0,976
t_8	0,5273	$\theta_8 = \omega * t_8 - \theta_{\text{ajuste}}$	0,257	$\cos \theta_8$	0,967
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
t_{172}	1,1680	$\theta_{172} = \omega * t_{172} - \theta_{\text{ajuste}}$	6,283	$\cos \theta_{172}$	1,000

✓ Cálculo do deslocamento em cada posição para todo o ciclo utilizando a curva de calibração de deslocamento da giga de teste (8).

No apêndice A, a Tab. 39 relaciona o $\cos \theta$, θ , tempo, tensão e o deslocamento do ciclo 1.

✓ Cálculo para o ciclo 2 da frequência do ciclo (Tab. 15).

$$\text{frequência do ciclo: } (f = \frac{1}{t_{\text{final}} - t_{\text{inicial}}}) \quad (27)$$

Tabela 15 - Frequência do ciclo 2

Ciclo 2	
Frequência (f) (Hz)	
$f = 1/(t_{\text{final}} - t_{\text{inicial}})$	
	1,5059
tempo (s)	
t_1	1,1680
t_2	1,1719
t_3	1,1758
t_4	1,1797
t_5	1,1836
t_6	1,1875
t_7	1,1914
t_8	1,1953
\vdots	\vdots
t_{171}	1,8320

- ✓ Cálculo da frequência angular do ciclo (Tab. 16):

$$\omega = 2\pi f \quad (28)$$

Tabela 16 - Frequência angular do ciclo 2

Ciclo 2	
Frequência (f) (Hz)	Frequência Angular (ω) (rad/s)
$f = 1/(t_{\text{final}} - t_{\text{inicial}})$	$\omega = 2\pi f$
1,5059	9,4617

O ciclo 1 iniciou em 0° e terminou em 360° . O ciclo 2 teve o seu início em 360° e o seu término em 720° . Assim, foi ajustado o ângulo θ_1 , correspondente a t_1 do ciclo 2, para que seja $6,28319$ rad (360°).

- ✓ Cálculo do θ_{ajuste} , fazendo: Δ_{ciclo1} = diferença entre o último valor e o primeiro valor de θ do ciclo 1, sendo obtido θ_{ajuste} , como sendo a diferença entre o primeiro valor de θ do ciclo 2 (θ_1) e Δ_{ciclo1} .

- ✓ Para todos os tempos (t_i), cálculo de θ_i e subtração de θ_{ajuste} .

- ✓ Ajuste para todos os pontos, obtendo-se para cada instante de tempo (t_i) um valor de θ_i e $\cos \theta_i$ (Tab. 17).

Tabela 17 - Cálculo do ângulo (θ) para cada tempo (t) do ciclo 2

Ciclo 2					
	Frequência (f) (Hz)	Frequência Angular (ω) (rad/s)	Δ_{ciclo1}	θ_{ajuste}	
	$f = 1/(t_{\text{final}} - t_{\text{inicial}})$	$\omega = 2 \pi f$	$\Delta_{\text{ciclo1}} = \omega * t_{172} - \omega * t_1$	$\theta_{\text{ajuste}} = \omega * t_1 - \Delta_{\text{ciclo1}}$	
	1,5059	9,4617	6,2832	4,7678	
	tempo (s)		ângulo (rad)		
t_1	1,1680	$\theta_1 = \omega * t_1 - \theta_{\text{ajuste}}$	6,283	$\cos \theta_1$	1,000
t_2	1,1719	$\theta_2 = \omega * t_2 - \theta_{\text{ajuste}}$	6,320	$\cos \theta_2$	0,999
t_3	1,1758	$\theta_3 = \omega * t_3 - \theta_{\text{ajuste}}$	6,357	$\cos \theta_3$	0,997
t_4	1,1797	$\theta_4 = \omega * t_4 - \theta_{\text{ajuste}}$	6,394	$\cos \theta_4$	0,994
t_5	1,1836	$\theta_5 = \omega * t_5 - \theta_{\text{ajuste}}$	6,431	$\cos \theta_5$	0,989
t_6	1,1875	$\theta_6 = \omega * t_6 - \theta_{\text{ajuste}}$	6,468	$\cos \theta_6$	0,983
t_7	1,1914	$\theta_7 = \omega * t_7 - \theta_{\text{ajuste}}$	6,505	$\cos \theta_7$	0,976
t_8	1,1953	$\theta_8 = \omega * t_8 - \theta_{\text{ajuste}}$	6,542	$\cos \theta_8$	0,967
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
t_{171}	1,8320	$\theta_{171} = \omega * t_{171} - \theta_{\text{ajuste}}$	12,566	$\cos \theta_{171}$	1,000

✓ Cálculo do deslocamento em cada posição para todo o ciclo utilizando a curva de calibração de deslocamento da giga de teste (8).

Os outros 21 ciclos foram calculados da mesma maneira que o ciclo 2. Com os valores medidos do deslocamento da giga de teste (mm) e os valores medidos de tensão do sensor (V) de todos os 23 ciclos, foi ajustada pelo método dos mínimos quadrados a curva de calibração de deslocamento do sensor indutivo:

$$\text{deslocamento} = Ax^2 + Bx + C \quad (29)$$

onde:

x = tensão medida com o sensor indutivo;

A, B e C = coeficientes do polinômio.

$$\text{Sensor 1 (1,5 Hz): } \text{deslocamento} = 0,0088V^2 + 0,270V - 0,687 \quad (30)$$

A Fig. 25 apresenta a curva de calibração de deslocamento do sensor 1 determinada na calibração dinâmica (tensão do sensor 1 x deslocamento da giga de teste).

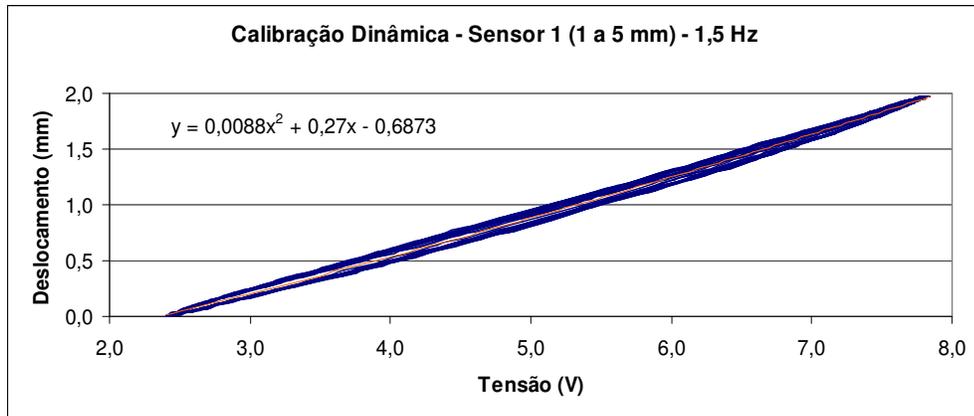


Figura 25 - Curva de calibração de deslocamento do sensor 1

✓ Com os valores medidos de deslocamento e tensão de todos os 23 ciclos, foi determinada a incerteza expandida do deslocamento do sensor indutivo:

A incerteza combinada do deslocamento é a soma das incertezas:

- incerteza padrão do deslocamento do disco (Tipo B); (u_{desloc})

- incerteza padrão do ângulo (Tipo B): ($u_{\theta} * \frac{\partial_{desloc}}{\partial_{\theta}}$)

- incerteza padrão da curva de ajuste (Tipo A): (u_{ajuste})

- incerteza padrão de tensão do analisador de sinal (Tipo B): (u_{Vcal})

- incerteza padrão da posição do sensor indutivo (Tipo B): ($u_{graus} * \frac{\partial_{V}}{\partial_{\theta}}$)

- coeficiente de sensibilidade (Ci): ($\frac{\partial_{desloc}}{\partial_{V}}$)

$$\begin{aligned}
 (u_{deslocamentodinâmico})^2 &= (u_{desloc})^2 + (u_{\theta} \frac{\partial_{desloc}}{\partial_{\theta}})^2 + (u_{ajuste})^2 + \\
 &+ [(u_{Vcal})^2 + (u_{graus} * \frac{\partial_{V}}{\partial_{\theta}})^2] * (Ci)^2
 \end{aligned} \quad (31)$$

A incerteza expandida do deslocamento é:

$$U_{deslocamentodinâmico} = t_{student} * u_{deslocamentodinâmico} \quad (32)$$

A Tab. 18 relaciona a curva de calibração de deslocamento, a incerteza expandida e as diversas incertezas consideradas.

Tabela 18 - Curva de calibração de deslocamento e incertezas (sensor 1)

Curva de calibração	$0,0088V^2 + 0,270V - 0,687$
$U_{deslocamen\ todinâmico}$	$\pm 0,11\text{ mm}$
u_{desloc}	0,034 mm
$u_{\theta} * \frac{\partial_{desloc}}{\partial_{\theta}}$	0,0162 mm
u_{ajuste}	0,040 mm
u_{Vcal}	1,48 E-04 V
$u_{graus} * \frac{\partial_v}{\partial_{\theta}}$	1,39E-02 V
$\frac{\partial_{desloc}}{\partial_v}$	0,288 mm/V
$u_{deslocamentodinâmico}$	$\pm 0,055\text{ mm}$

Este procedimento foi utilizado para obter a curva de deslocamento dos 02 sensores indutivos de proximidade nas freqüências: 1,5 Hz, 2 Hz, 2,5 Hz e 3 Hz. A Tab. 19 relaciona as curvas de calibração de deslocamento para cada sensor nas diversas freqüências.

Tabela 19 - Curvas de calibração de deslocamento (sensores 1 e 2)

	Sensor 1 (1 a 5 mm)	Sensor 2 (2 a 4 mm)
Freqüência		
1,5 Hz	$y = 0,0088x^2 + 0,270x - 0,687$	$y = 0,0038x^2 + 0,169x - 0,071$
2 Hz	$y = 0,0089x^2 + 0,270x - 0,689$	$y = 0,0037x^2 + 0,170x - 0,072$
2,5 Hz	$y = 0,0087x^2 + 0,271x - 0,690$	$y = 0,0037x^2 + 0,170x - 0,071$
3 Hz	$y = 0,0086x^2 + 0,272x - 0,692$	$y = 0,0037x^2 + 0,170x - 0,072$