

## 4 Resultados e Análise

### 4.1 Calibração estática: método FURNAS x método proposto

#### 4.1.1 Calibração estática: método FURNAS

Os sensores de proximidade indutivos foram calibrados pelo método utilizado por FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. (seção 2.3 - Fig. 7), são obtidas as curvas de calibração mostradas nas Figuras 26 e 27:

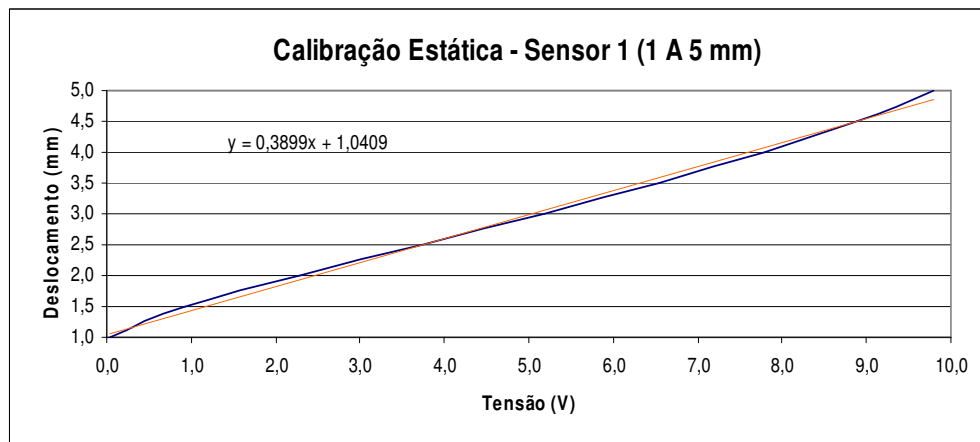


Figura 26 - Curva de calibração estática do sensor 1

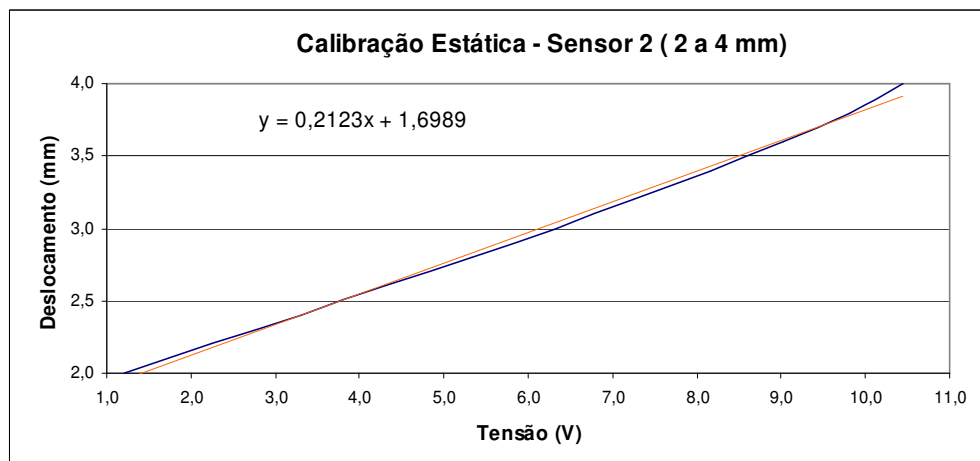


Figura 27 - Curva de calibração estática do sensor 2

Apesar do procedimento de calibração do sensor indutivo utilizado por FURNAS não incluir cálculo da incerteza de calibração, para efeito de análise dos resultados, esta incerteza foi calculada.

Com os valores medidos do deslocamento do relógio comparador (mm) e os valores medidos de tensão do sensor (V), foi determinada a incerteza expandida do deslocamento do 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 do analisador de sinal (Tipo B): ( $u_{analisador}$ )

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

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

$$(u_{deslocamentoestática})^2 = (u_{relógio})^2 + (u_{ajuste})^2 + (u_{analisador})^2 * (Ci)^2 \quad (33)$$

A incerteza expandida do deslocamento é:

$$U_{deslocamentoestática} = t_{student} * u_{deslocamentoestática} \quad (34)$$

A Tab. 20 relaciona as curvas de calibração de deslocamento, a incerteza expandida e as diversas incertezas consideradas.

Tabela 20 - Curva de calibração de deslocamento e incerteza (método FURNAS)

	Sensor 1	Sensor 2
Curva de calibração	$deslocamento = 0,3899V + 1,0409$	$deslocamento = 0,2123V + 1,6989$
$U_{deslocamen\ toestática}$	$\pm 0,18$ mm	$\pm 0,083$ mm
$u_{relógio}$	0,060 mm	0,060 mm
$u_{ajuste}$	0,088 mm	0,041 mm
$u_{analisador}$	0,024 V	0,024 V
$\frac{\partial_{desloc}}{\partial V}$	0,3899 mm/V	0,2123 V
$u_{deslocamen\ toestática}$	$\pm 0,088$ mm	$\pm 0,0413$ mm

#### 4.1.2

##### Calibração estática: método proposto

Os sensores foram calibrados estaticamente usando a giga de teste (seção 3.2.1 – Fig. 17).

Foram obtidas as curvas de calibração de deslocamento dos sensores indutivos e suas respectivas incertezas, conforme a Tab. 21.

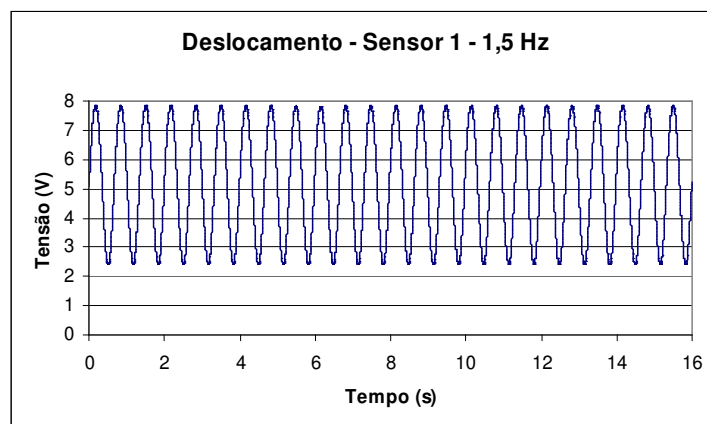
Tabela 21 - Curvas de calibração de deslocamento e incerteza (método proposto)

	Curva de calibração	Incerteza
Sensor 1	$deslocamento = 0,0063x^2 + 0,2983x - 0,7551$	$U_{deslocamentoestática} = \pm 0,055 \text{ mm}$
Sensor 2	$deslocamento = 0,0035x^2 + 0,1729x - 0,0854$	$U_{deslocamentoestática} = \pm 0,074 \text{ mm}$

#### 4.1.3

##### Valores de deslocamento calculados (método FURNAS e método proposto)

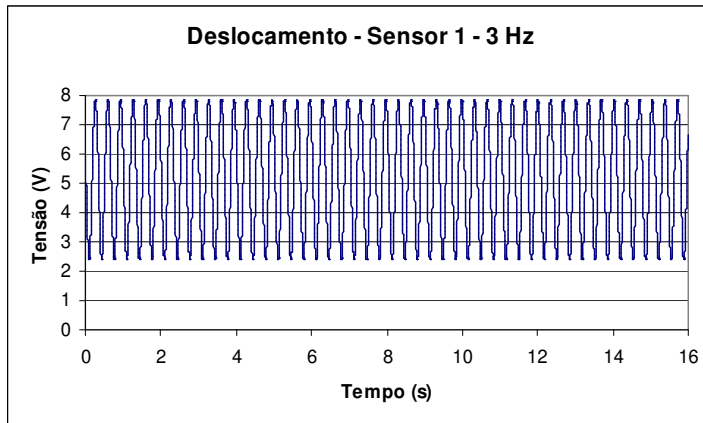
Foram utilizadas as curvas de calibração obtidas na calibração estática (método FURNAS e método proposto) para calcular o deslocamento medido pelos sensores indutivos em uma medição dinâmica. As Figuras 28 e 29 representam o deslocamento da giga de teste medida com o sensor de proximidade indutivo 1 nas frequências 1,5 Hz e 3 Hz, respectivamente.



Tensão máxima = 7,8363 V

Tensão mínima = 2,4029 V

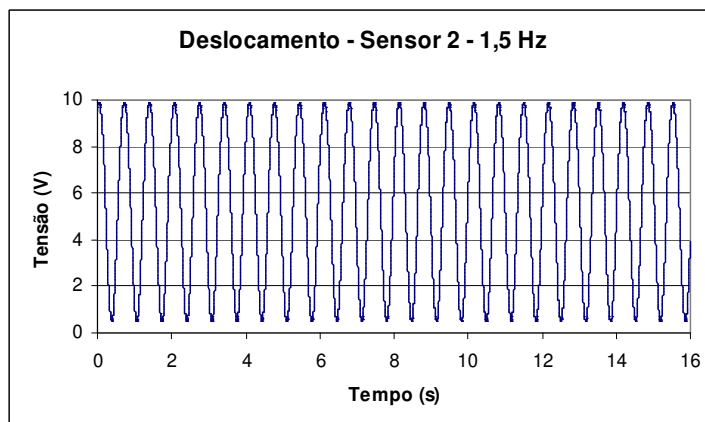
Figura 28 - Deslocamento medido com o sensor 1 - 1,5 Hz



Tensão máxima = 7,8381 V  
Tensão mínima = 2,4065 V

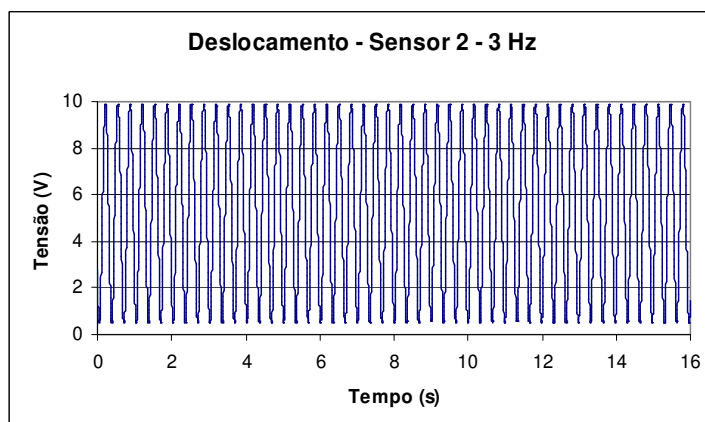
Figura 29 - Deslocamento medido com o sensor 1 - 3 Hz

As Figuras 30 e 31 representam o deslocamento da giga de teste medido com o sensor de proximidade indutivo 2 nas frequências 1,5 Hz e 3 Hz, respectivamente.



Tensão máxima = 9,8726 V  
Tensão mínima = 0,5011 V

Figura 30 - Deslocamento medido com o sensor 2 - 1,5 Hz



Tensão máxima = 9,8886 V  
Tensão mínima = 0,5049 V

Figura 31 - Deslocamento medido com o sensor 2 - 3 Hz

Determinou-se a medida do deslocamento utilizando as curvas de calibração obtidas na calibração estática pelo método atualmente utilizado por FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. e pelo método proposto neste trabalho.

Pode ser observado nas Tabelas 22 e 23, que para os 02 sensores indutivos, os resultados são os mesmos, considerando a faixa de incerteza de medição, sendo que a incerteza do método proposto é menor do que a incerteza do método FURNAS.

Nas Tabelas 22 e 23 o deslocamento é definido como:

$$\text{deslocamento(mm)} = Ax^2 + Bx + C = A * (\text{tensão}^2) + B * (\text{tensão}) + C \quad (35)$$

$$\text{deslocamento(mm)} = Bx + C = B * (\text{tensão}) + C \quad (36)$$

Tabela 22 - Resultados da calibração estática do sensor 1

Sensor 1 (1 mm a 5 mm)

Frequência: 1,5 Hz

	Tensão máxima (V) 7,8363	Tensão mínima (V) 2,4029	Deslocamento calculado	Deslocamento padrão
	deslocamento máximo (mm)	deslocamento mínimo (mm)	mm	mm
método proposto	1,97	0,00	1,97	1,98
método Furnas	4,10	1,98	2,12	1,98

Frequência: 3 Hz

	Tensão máxima (V) 7,8381	Tensão mínima (V) 2,4065	Deslocamento calculado	Deslocamento padrão
	deslocamento máximo (mm)	deslocamento mínimo (mm)	mm	mm
método proposto	1,97	0,00	1,97	1,98
método Furnas	4,10	1,98	2,12	1,98

método proposto	deslocamento = $0,0063x^2 + 0,298x - 0,755$	incerteza = $\pm 0,055$ mm
método Furnas	deslocamento = $0,3899x + 1,0409$	incerteza = $\pm 0,18$ mm

tensão mínima	valor mínimo de tensão do deslocamento (Fig. 25 e 26)
tensão máxima	valor máximo de tensão do deslocamento (Fig. 25 e 26)

Deslocamento calculado =	deslocamento máximo - deslocamento mínimo
Deslocamento padrão =	deslocamento medido com o relógio comparador

Tabela 23 - Resultados da calibração estática sensor 2

Sensor 2 (2 mm a 4 mm)

Frequência: 1,5 Hz

	Tensão máxima (V) 9,8726	Tensão mínima (V) 0,5011	Deslocamento calculado	Deslocamento padrão
	deslocamento máximo (mm)	deslocamento mínimo (mm)	mm	mm
método proposto	1,96	0,00	1,96	1,98
método Furnas	3,79	1,81	1,99	1,98

Frequência: 3 Hz

	Tensão máxima (V) 9,8886	Tensão mínima (V) 0,5049	Deslocamento calculado	Deslocamento padrão
	deslocamento máximo (mm)	deslocamento mínimo (mm)	mm	mm
método proposto	1,97	0,00	1,96	1,98
método Furnas	3,80	1,81	1,99	1,98

método proposto	deslocamento = $0,0035x^2 + 0,1729x - 0,0854$	incerteza = $\pm 0,074$ mm
método Furnas	deslocamento = $0,2123x + 1,6989$	incerteza = $\pm 0,083$ mm

tensão mínima	valor mínimo de tensão do deslocamento (Fig. 27 e 28)
tensão máxima	valor máximo de tensão do deslocamento (Fig. 27 e 28)

Deslocamento calculado =	deslocamento máximo - deslocamento mínimo
Deslocamento padrão =	deslocamento medido com o relógio comparador

## 4.2

### Comportamento dos sensores nas diferentes frequências

Na calibração dinâmica, os sensores foram submetidos a diferentes frequências. Comparando-se os valores de deslocamento calculados para cada curva obtida na calibração, verificou-se que os sensores indicaram o mesmo valor de deslocamento.

Nas Tabelas 24 e 25, o deslocamento é definido como:

$$\text{deslocamento}(mm) = (\text{desloc.máx.} - \text{desloc.mín}) \quad (37)$$

$$\text{deslocamento}(mm) = Ax^2 + Bx + C = A * (\text{tensão}^2) + B * (\text{tensão}) + C \quad (38)$$

As Tabelas 24 e 25, relacionam os valores de tensão medidos com os sensores 1 e 2, os respectivos valores de deslocamentos calculados com as curvas obtidas na calibração dinâmica nas diferentes frequências e o deslocamento padrão.

Tabela 24 - Deslocamento utilizando as diferentes curvas de calibração (sensor 1)

Sensor 1 (1 mm a 5 mm)				
Frequência: 1,5 Hz				
Frequência	Tensão máxima (V)	Tensão mínima (V)	Deslocamento calculado	Deslocamento padrão
	7,8363	2,4029		
	deslocamento máximo (mm)	deslocamento mínimo (mm)	mm	mm
1,5 Hz	1,97	0,01	1,96	1,98
2 Hz	1,97	0,01	1,96	1,98
2,5 Hz	1,97	0,01	1,96	1,98
3 Hz	1,97	0,01	1,96	1,98
1,5 Hz	deslocamento= $0,0088x^2 + 0,270x - 0,687$		incerteza = $\pm 0,11$ mm	
2 Hz	deslocamento= $0,0089x^2 + 0,270x - 0,689$		incerteza = $\pm 0,086$ mm	
2,5 Hz	deslocamento= $0,0087x^2 + 0,271x - 0,690$		incerteza = $\pm 0,099$ mm	
3 Hz	deslocamento= $0,0086x^2 + 0,272x - 0,692$		incerteza = $\pm 0,081$ mm	

tensão mínima = valor mínimo de tensão do deslocamento (Fig. 25)

tensão máxima = valor máximo de tensão do deslocamento (Fig. 25)

Tabela 25 - Deslocamento utilizando as diferentes curvas de calibração (sensor2)

Sensor 2 (2 mm a 4 mm)				
Frequência: 1,5 Hz				
Frequência	Tensão máxima (V)	Tensão mínima (V)	Deslocamento calculado	Deslocamento padrão
	9,8726	0,5011		
	deslocamento máximo (mm)	deslocamento mínimo (mm)	mm	mm
1,5 Hz	1,97	0,01	1,95	1,98
2 Hz	1,97	0,01	1,95	1,98
2,5 Hz	1,97	0,02	1,95	1,98
3 Hz	1,97	0,01	1,95	1,98
1,5 Hz	deslocamento= $0,0038x^2 + 0,169x - 0,071$		incerteza = $\pm 0,10$ mm	
2 Hz	deslocamento= $0,0037x^2 + 0,170x - 0,072$		incerteza = $\pm 0,10$ mm	
2,5 Hz	deslocamento= $0,0037x^2 + 0,170x - 0,071$		incerteza = $\pm 0,11$ mm	
3 Hz	deslocamento= $0,0037x^2 + 0,170x - 0,072$		incerteza = $\pm 0,10$ mm	

tensão mínima = valor mínimo de tensão do deslocamento (Fig. 27)

tensão máxima = valor máximo de tensão do deslocamento (Fig. 27)

### 4.3 Calibração estática x calibração dinâmica

As Tabelas 26 e 27 apresentam os valores de tensão medidos com os sensores 1 e 2, os respectivos valores de deslocamento calculados com as curvas obtidas nas calibrações dinâmica e estática e o deslocamento padrão.

Pode ser observado nas Tabelas 26 e 27 que, para os 02 sensores indutivos, os resultados são os mesmos, considerando a faixa de incerteza de medição, sendo que a incerteza da calibração estática é menor do que a incerteza da calibração dinâmica.

Nas Tab. 26 e 27, o deslocamento é definido como:

$$\text{deslocamento}(mm) = (\text{desloc.máx.} - \text{desloc.mín}) \quad (39)$$

$$\text{deslocamento}(mm) = Ax^2 + Bx + C = A * (\text{tensão}^2) + B * (\text{tensão}) + C \quad (40)$$

Tabela 26 - Calibração estática x calibração dinâmica (sensor 1)

Sensor 1 (1 mm a 5 mm)  
Frequência: 1,5 Hz

Frequência	Tensão máxima (V)	Tensão mínima (V)	Deslocamento calculado mm	Deslocamento padrão mm
	7,8363	2,4029		
	deslocamento máximo (mm)	deslocamento mínimo (mm)		
1,5 Hz	1,97	0,01	1,96	1,98
2 Hz	1,97	0,01	1,96	1,98
2,5 Hz	1,97	0,01	1,96	1,98
3 Hz	1,97	0,01	1,96	1,98
estática	1,97	0,00	1,97	1,98
1,5 Hz	deslocamento = $0,0088x^2 + 0,270x - 0,687$		incerteza = $\pm 0,11$ mm	
2 Hz	deslocamento = $0,0089x^2 + 0,270x - 0,689$		incerteza = $\pm 0,086$ mm	
2,5 Hz	deslocamento = $0,0087x^2 + 0,271x - 0,690$		incerteza = $\pm 0,099$ mm	
3 Hz	deslocamento = $0,0086x^2 + 0,272x - 0,692$		incerteza = $\pm 0,081$ mm	
estática	deslocamento = $0,0063x^2 + 0,298x - 0,755$		incerteza = $\pm 0,055$ mm	

tensão mínima = valor mínimo de tensão do deslocamento (Fig. 25)

tensão máxima = valor máximo de tensão do deslocamento (Fig. 25)

Tabela 27 - Calibração estática x calibração dinâmica (sensor 2)

Sensor 2 (2 mm a 4 mm)  
Frequência: 1,5 Hz

Frequência	Tensão máxima (V)	Tensão mínima (V)	Deslocamento calculado mm	Deslocamento padrão mm
	9,8726	0,5011		
	deslocamento máximo (mm)	deslocamento mínimo (mm)		
1,5 Hz	1,97	0,01	1,95	1,98
2 Hz	1,97	0,01	1,95	1,98
2,5 Hz	1,97	0,01	1,95	1,98
3 Hz	1,97	0,01	1,95	1,98
estática	1,96	0,00	1,96	1,98
1,5 Hz	deslocamento = $0,0038x^2 + 0,169x - 0,071$		incerteza = $\pm 0,10$ mm	
2 Hz	deslocamento = $0,0037x^2 + 0,170x - 0,072$		incerteza = $\pm 0,10$ mm	
2,5 Hz	deslocamento = $0,0037x^2 + 0,170x - 0,072$		incerteza = $\pm 0,11$ mm	
3 Hz	deslocamento = $0,0037x^2 + 0,170x - 0,072$		incerteza = $\pm 0,10$ mm	
estática	deslocamento = $0,0035x^2 + 0,173x - 0,085$		incerteza = $\pm 0,074$ mm	

tensão mínima = valor mínimo de tensão do deslocamento (Fig. 27)

tensão máxima = valor máximo de tensão do deslocamento (Fig. 27)