



Denize Azevedo da Silva

**Metodologia de calibração de um sensor de
proximidade indutivo para medição de
oscilação em geradores hidroelétricos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia, Qualidade e Inovação da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Alcir de Faro Orlando, PhD.

Rio de Janeiro
Setembro de 2006



Denize Azevedo da Silva

**Metodologia de calibração de um sensor de proximidade indutivo
para medição de oscilação em geradores hidroelétricos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia do centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora e homologada pela Coordenação Setorial de Pós-Graduação, formalizado pelas respectivas assinaturas.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Alcir de Faro Orlando

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)

Prof. Dr. Carlos Roberto Hall Barbosa

Programa de Pós-Graduação em Metrologia (PósMQI)

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)

Prof. Dr. Paula Medeiros Proença de Gouvêa

Gávea Sensors - Sistemas de Medição Ltda.

Prof. Dr. Mauro Speranza Neto

Departamento de Engenharia Mecânica

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)

Coordenação Setorial de Pós-Graduação:

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial de Pós-graduação do

Centro Técnico Científico (PUC-Rio)

Rio de Janeiro, 01 de setembro de 2006

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Denize Azevedo da Silva

Formou-se em Técnico em Eletricidade no CEFET - RJ em 1979. Graduiu-se em Matemática na Faculdade de Filosofia de Passos – MG em 1993. Trabalha em FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., desde 1980, no Laboratório de Medidas Elétricas e Eletrônicas do Centro Técnico de Ensaios e Medições – CTE.O na calibração de instrumentos nas áreas de eletricidade e tempo e frequência. Atualmente é responsável pela implantação dos laboratórios de Pressão e Metrologia Dimensional do CTE.O.

Ficha Catalográfica

Silva, Denize Azevedo da

Metodologia de calibração de um sensor de proximidade indutivo para medição de oscilação em geradores hidroelétricos / Denize Azevedo da Silva ; orientador: Alcir de Faro Orlando. – 2006.

90 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Metrologia para Qualidade e Inovação)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

Inclui bibliografia

1. Metrologia – Teses. 2. Calibração. 3. Sensor de proximidade indutivo. 4. Oscilação. I. Orlando, Alcir de Faro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Metrologia para Qualidade e Inovação. III. Título.

CDD: 389.1

Agradecimentos

Ao meu orientador professor Dr. Alcir de Faro Orlando, pelo estímulo e direcionamento para a realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Maurício Nogueira Frota, Diretor do MQI, a Eliane Albernaz e Márcia Figueiredo, secretárias do MQI, por nos proporcionarem um curso com qualidade e organização.

Aos colegas do Pós-MQI, pelo companheirismo durante as aulas.

A FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A., por intermédio do Superintendente da Engenharia de Manutenção – EM.O, o engenheiro Ricardo Medeiros e do chefe do Departamento do Centro Técnico de Ensaios e Medições – CTE.O, o engenheiro Luiz Antonio Gouvêa de Albuquerque, pelo incentivo e por ter proporcionado a infra-estrutura material para a realização do mestrado.

À Divisão de Laboratório de Medidas Elétricas e Eletrônicas – LAME.O, ao chefe de divisão, o engenheiro Juarez Neves Cardoso, aos colegas: o engenheiro Luiz Henrique Pereira Junqueira, os técnicos Marzano Carlos Lacerda, Maria do Carmo Faria, Walter Venturini da Silva e Keila Souza Vilela Tiba, por terem suprido a minha ausência nos serviços de calibração, devido às viagens e ao desenvolvimento com esse trabalho.

À Divisão de Oficina Eletromecânica – DOFE.O, ao chefe de divisão, o tecnólogo Ruy Bicego Junior, aos técnicos Edílson Pereira da Silva, Antonio Carlos Nassor e Messias José Beirigo, pela confecção das peças utilizadas nos experimentos.

À Divisão de Ensaios Especiais – DENE.O, ao chefe de divisão, o engenheiro Jorge Eduardo Teles de Azevedo, aos colegas: o engenheiro Sérgio Ferreira Campos, os técnicos Ramil Carvalho Teixeira, André Fernando Bourbon de Oliveira, Anderson Pires Ventura e Fábio Henrique Piconez, pelos esclarecimentos sobre as particularidades do ensaio de oscilação nos hidrogeradores e ajuda no uso dos equipamentos utilizados nos experimentos.

Aos colegas do setor administrativo, pelas providências de reservas nas viagens para o Rio de Janeiro.

A todos os colegas do CTE.O, pela amizade com que sempre me distinguiram.

Ao Departamento de Apoio e Controle Técnico - DCT.C, em especial ao engenheiro Joilson José Inácio, pela calibração do relógio comparador e empréstimo de equipamento para a execução dos ensaios.

Ao Departamento Regional Minas – DRM.O, ao técnico Luiz Carlos Menezes Junior, pelas informações sobre os geradores da Usina de Furnas.

À Sensor do Brasil, representada pelo Sr. Roger Ocada, pelo fornecimento dos sensores indutivos TURCK para a realização desse trabalho.

Aos meus pais, Mario Moreira da Silva e Layr Azevedo da Silva, por estarem sempre ao meu lado.

Ao meu marido Roberto Obvioslo, meu amigo e colaborador, por ter me ajudado durante todo o mestrado.

Às minhas filhas, Carolina e Juliana, por entenderem a minha ausência durante o curso.

A Deus, essa energia maior, que me presenteou colocando na minha vida essas pessoas que me ajudaram a alcançar o meu objetivo.

Resumo

Silva, Denize Azevedo da. **Metodologia de calibração de um sensor de proximidade indutivo para medição de oscilação em geradores hidroelétricos.** Rio de Janeiro, 2006. 90p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia, Qualidade e Inovação, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho apresenta resultados do comportamento do sensor de proximidade indutivo em medição de oscilação de geradores hidroelétricos do sistema de geração de FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. Para o desenvolvimento deste estudo, foram utilizados dois (2) sensores de proximidade indutivos. A metodologia consistiu em calibrar estaticamente e dinamicamente o sensor de proximidade indutivo. Para isto, 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. Ajustou-se a excentricidade da giga de teste e foram marcados pontos no disco de 30° em 30°. Foi feita a calibração estática da giga de teste, medindo o deslocamento em cada um destes treze (13) pontos com um relógio comparador calibrado. Para a calibração estática do sensor, este foi posicionado à frente do disco da giga de teste a uma distância conhecida, deslocou-se o eixo manualmente para cada um dos pontos e obteve-se o sinal de saída do sensor com o analisador de sinal calibrado. A curva de calibração estática foi então determinada com a respectiva incerteza de medição. Para a calibração dinâmica, o mesmo sistema foi posto em rotação nas velocidades nominais dos geradores hidroelétricos de FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A. (90 rpm, 120 rpm, 150 rpm e 180 rpm). A resposta do sensor foi então comparada nas diferentes rotações, com o que se determinou a atenuação do sinal devido ao aumento da frequência de operação. Os dados obtidos estaticamente e dinamicamente foram avaliados, e as incertezas determinadas. As calibrações estáticas realizadas pelo procedimento de FURNAS e deste trabalho produziram os mesmos resultados, considerando a faixa de incerteza de medição. Para reduzir a incerteza de calibração do procedimento de FURNAS, propõe-se que seus resultados sejam ajustados por um polinômio do segundo grau. A calibração dinâmica realizada em várias frequências mostrou que não existe

diferença entre os valores obtidos estaticamente e dinamicamente, muito embora esta tenha uma incerteza mais elevada. Para simplificação da calibração dos sensores, propõe-se que ela seja, portanto, realizada estaticamente.

Palavras-chave

Sensor de proximidade indutivo; calibração; metrologia; incerteza de medição; oscilação.

Abstract

Silva, Denize Azevedo da. **Calibration methodology of an inductive proximity sensor for oscillation measurement in hydroelectric generators.** Rio de Janeiro, 2006. 90p. MSc.Dissertation – Programa de Pós-Graduação em Metrologia, Qualidade e Inovação, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents the results of the behavior of the inductive proximity sensor at the measurement of oscillation in hydroelectric generators from the generation system of Furnas Centrais Elétricas S.A.. To develop this study, two (2) inductive proximity sensors were used. The methodology consisted of calibrating statically and dynamically the inductive proximity sensor. For this, it was used a test mock-up: a system composed by an engine with variable speed and a disc with variable and controlled eccentricity connected to the axle. The eccentricity of the test mock-up was adjusted and thirteen (13) points were marked on the disc, every 30°. The static calibration of the test mock-up has been made, by measuring the displacement in each one of these thirteen (13) points with a calibrated dial indicator. For the static calibration of the sensor, the sensor itself was positioned in front of the test mock-up disc at a known distance, the axle was dislocated manually for each one of the points and the output signal of the sensor was measured with a calibrated signal analyzer. The curve of the static calibration then was determined with the respective uncertainty of the measurement. For the dynamic calibration, the same system was run in the nominal speeds of the hydroelectric generators from Furnas Centrais Elétricas S.A. (90 rpm, 120 rpm, 150 rpm and 180 rpm). The response of the sensor was then compared at the different rotations, being determined the attenuation of the signal due to the increase of the operation frequency. The static and dynamic data were evaluated, and the uncertainties determined. The static calibrations carried through by the procedure of FURNAS and by this work produced the same results, considering the range of measurement uncertainty. To reduce the calibration uncertainty of the FURNAS procedure, it is proposed that its results be adjusted by a polynomial of second degree. The dynamic calibration carried at several frequencies showed that there is no difference between the static and dynamic values, even though the

dynamic calibration has a more elevated uncertainty. To simplify the calibration of the sensors, it is proposed then that it is carried statically only.

Keywords

Inductive proximity sensor; calibration; metrology; uncertainty in measurement; oscillation.

Sumário

1 Introdução	17
1.1 Medição de oscilação em FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A.	17
1.2 Objetivos	21
2 Medição da oscilação dos geradores hidroelétricos do sistema FURNAS	22
2.1 Vibração e oscilação	22
2.2 Funcionamento do sensor indutivo de proximidade	24
2.3 Calibração do sensor – método utilizado em FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S.A.	26
2.4 Medição da oscilação nos geradores	28
3 Procedimento Experimental	30
3.1 Calibração estática da giga de teste	31
3.2 Calibração estática do sensor de proximidade indutivo	36
3.3 Calibração dinâmica do sensor de proximidade indutivo	44
4 Resultados e Análise	53
4.1 Calibração estática: método FURNAS x método proposto	53
4.2 Comportamento dos sensores nas diferentes frequências	58
4.3 Calibração estática x calibração dinâmica	59
5 Conclusões	61
6 Referências Bibliográficas	62
Apêndice A	64

Nomenclaturas

C_i , coeficiente de sensibilidade $C_i = \frac{\partial_{desloc}}{\partial_V}$

u_c , incerteza padrão combinada

U , incerteza expandida

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

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

$u_{analisador}$, incerteza padrão do analisador de sinal (Tipo B) (u_{Vcal} e u_{rep})

u_{desloc} , incerteza padrão combinada da calibração estática (Tipo B)

$u_{graus} \frac{\partial_{desloc}}{\partial_\theta}$, incerteza padrão da posição do relógio comparador (Tipo B)

$u_{graus} \frac{\partial_V}{\partial_\theta}$, incerteza padrão da posição do sensor (Tipo B)

u_{pcal} , incerteza padrão de calibração do relógio comparador (Tipo B)

u_{presol} , incerteza padrão de resolução do relógio comparador (Tipo B)

$u_{relógio}$, incerteza padrão do relógio comparador (Tipo B) (u_{presol} e u_{pcal})

u_{rep} , incerteza padrão de repetitividade (Tipo A)

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

ω , frequência angular

Símbolos gregos

Δ_{ciclo1} , diferença entre os valores do ângulo do ciclo 1

θ , ângulo

Lista de figuras

Figura 1 - Gerador e turbina hidroelétricas	18
Figura 2 - Sapata do mancal queimada	20
Figura 3 - Projeção ortogonal do movimento circular uniforme	23
Figura 4 - Deslocamento do ponto P	23
Figura 5 - Diagrama em bloco do sensor indutivo	24
Figura 6 - Parte interna do sensor indutivo	24
Figura 7 - Calibração estática do sensor indutivo – método FURNAS	27
Figura 8 - Montagem do sensor indutivo para medição da oscilação	28
Figura 9 - Equipamentos utilizados na medição da oscilação	29
Figura 10 - Sensores indutivos	30
Figura 11 - Analisador de sinal	30
Figura 12 - Relógio comparador	31
Figura 13 - Discos confeccionados para o procedimento experimental	32
Figura 14 - Detalhe do ajuste da excentricidade do disco	33
Figura 15 - Calibração estática da giga de teste	33
Figura 16 - Gráfico da posição x deslocamento	35
Figura 17 - Calibração estática do sensor indutivo - método proposto	36
Figura 18 - Gráfico posição x deslocamento do sensor 1	38
Figura 19 - Gráfico posição x deslocamento do sensor 2	38
Figura 20 - Curva de calibração de deslocamento do sensor 1	40
Figura 21 - Curva de calibração de deslocamento do sensor 2	41
Figura 22 - Calibração dinâmica do sensor indutivo - método proposto	45
Figura 23 - Frequência de 1,5 Hz do sensor 1.	46
Figura 24 - Deslocamento do sensor 1	46
Figura 25 - Curva de calibração de deslocamento do sensor 1	51
Figura 26 - Curva de calibração estática do sensor 1	53
Figura 27 - Curva de calibração estática do sensor 2	53
Figura 28 - Deslocamento medido com o sensor 1 - 1,5 Hz	55
Figura 29 - Deslocamento medido com o sensor 1 - 3 Hz	56
Figura 30 - Deslocamento medido com o sensor 2 - 1,5 Hz	56

Figura 31 - Deslocamento medido com o sensor 2 - 3 Hz	56
Figura 32 - Freqüência de 2 Hz do sensor 1	82
Figura 33 - Freqüência de 2,5 Hz do sensor 1	83
Figura 34 - Freqüência de 3 Hz do sensor 1	83
Figura 35 - Freqüência de 1,5 Hz do sensor 2	83
Figura 36 - Freqüência de 2 Hz do sensor 2	84
Figura 37 - Freqüência de 2,5 Hz do sensor 2	84
Figura 38 - Freqüência de 3 Hz do sensor 2	84
Figura 39 - Deslocamento do sensor 1 na freqüência de 2 Hz	85
Figura 40 - Deslocamento do sensor 1 na freqüência de 2,5 Hz	85
Figura 41 - Deslocamento do sensor 1 na freqüência de 3 Hz	86
Figura 42 - Deslocamento do sensor 2 na freqüência de 1,5 Hz	86
Figura 43 - Deslocamento do sensor 2 na freqüência de 2 Hz	86
Figura 44 - Deslocamento do sensor 2 na freqüência de 2,5 Hz	87
Figura 45 - Deslocamento do sensor 2 na freqüência de 3 Hz	87
Figura 46 - Curva de calibração - sensor 1 - 2 Hz	88
Figura 47 - Curva de calibração - sensor 1 - 2,5 Hz	88
Figura 48 - Curva de calibração - sensor 1 - 3 Hz	88
Figura 49 - Curva de calibração - sensor 2 - 1,5 Hz	89
Figura 50 - Curva de calibração - sensor 2 - 2 Hz	89
Figura 51 - Curva de calibração - sensor 2 - 2,5 Hz	89
Figura 52 - Curva de calibração - sensor 2 - 3 Hz	90

Lista de tabelas

Tabela 1 - Folga diametral do mancal das usinas hidroelétricas	19
Tabela 2 - Fator de permeabilidade magnética	25
Tabela 3 - Curva de calibração de deslocamento da giga de teste	34
Tabela 4 - Curva de calibração e incertezas (giga de teste)	35
Tabela 5 - Curva de calibração de tensão do sensor 1	37
Tabela 6 - Curva de calibração de tensão do sensor 2	38
Tabela 7 - Curvas de calibração de tensão e incertezas	39
Tabela 8 - Curva de calibração de deslocamento do sensor 1	41
Tabela 9 - Curva de calibração de deslocamento do sensor 2	42
Tabela 10 - Curvas de calibração de deslocamento e incertezas	43
Tabela 11 - Rotação nominal das usinas hidroelétricas	44
Tabela 12 - Freqüência do ciclo 1	47
Tabela 13 - Freqüência angular do ciclo 1	47
Tabela 14 - Cálculo do ângulo (θ) para cada tempo (t) do ciclo 1	48
Tabela 15 - Freqüência do ciclo 2	49
Tabela 16 - Freqüência angular do ciclo 2	49
Tabela 17 - Cálculo do ângulo (θ) para cada tempo (t) do ciclo 2	50
Tabela 18 - Curva de calibração de deslocamento e incertezas (sensor 1)	52
Tabela 19 - Curvas de calibração de deslocamento (sensores 1 e 2)	52
Tabela 20 - Curva de calibração de deslocamento e incerteza (método FURNAS)	54
Tabela 21 - Curvas de calibração de deslocamento e incerteza (método proposto)	55
Tabela 22 - Resultados da calibração estática do sensor 1	57
Tabela 23 - Resultados da calibração estática sensor 2	58
Tabela 24 - Deslocamento utilizando as diferentes curvas de calibração (sensor 1)	59
Tabela 25 - Deslocamento utilizando as diferentes curvas de calibração (sensor 2)	59

Tabela 26 - Calibração estática x calibração dinâmica (sensor 1)	60
Tabela 27 - Calibração estática x calibração dinâmica (sensor 2)	60
Tabela 28 - Valores de t-student	67
Tabela 29 - Incerteza da curva ângulo x deslocamento	71
Tabela 30 - Curva ângulo x deslocamento do sensor 1	71
Tabela 31 - Incerteza da curva ângulo x deslocamento do sensor 1	72
Tabela 32 - Curva ângulo x deslocamento do sensor 2	72
Tabela 33 - Incerteza da curva ângulo x deslocamento do sensor 2	73
Tabela 34 - Incerteza da curva tensão x deslocamento do sensor 1	73
Tabela 35 - Incerteza da curva tensão x deslocamento do sensor 2	74
Tabela 36 - Incerteza da calibração estática do sensor 1	75
Tabela 37 - Incerteza da calibração estática do sensor 2	76
Tabela 38 - Valores de tempo (s) x tensão (V) do sensor 1	76
Tabela 39 - Valores de deslocamento do ciclo 1 - sensor 1	79

Quando não está em nosso poder seguir o que é verdade,
seguimos o que é mais provável.

René Descartes (1596-1650)
Matemático e filósofo francês