



Christiane Sampaio de Almeida Gusman

**Incerteza de Medição em Redes Neurais Artificiais
Aplicadas à Manutenção Preditiva de Transformadores**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Metrologia. Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Metrologia.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Hall Barbosa

Rio de Janeiro
Setembro de 2011



Christiane Sampaio de Almeida Gusman

**Incerteza de Medição em Redes Neurais Artificiais
Aplicadas à Manutenção Preditiva de Transformadores**

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

Prof. Dr. Carlos Roberto Hall Barbosa

Orientador

Programa de Pós-Graduação em Metrologia (PósMQI)
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)

Prof. Dra. Karla Tereza Figueiredo Leite

Centro Universitário do Estado da Zona Oeste (UEZO)

Prof. Dr. Reinaldo Castro Souza

Departamento de Elétrica e

Programa de Pós-Graduação em Metrologia (PósMQI)
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)

Prof. Dr. Jorge Luís Machado do Amaral

Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

Prof. José Eugênio Leal

Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 16 de Setembro de 2011

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

Christiane Sampaio de Almeida Gusman

Graduou-se em Engenharia Eletricista com ênfase em Eletrônica em 1995. Kursou Pós Graduação em Engenharia de Custos em 2004.

Ficha Catalográfica

Gusman, Christiane Sampaio de Almeida

Incerteza de Medição em Redes Neurais Artificiais Aplicadas à Manutenção Preditiva de Transformadores / Christiane Sampaio de Almeida Gusman; Orientador: Carlos Roberto Hall Barbosa – 2011.

126 f. : il. (color.); 30 cm

Dissertação (Mestrado em Metrologia para a Qualidade e Inovação)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação, 2011.

Inclui bibliografia e anexos

1. Introdução; 2. Manutenção Preditiva de Transformadores; 3. Redes Neurais Artificiais; 4. Conceito de Incerteza de Medição; 5. Incerteza de Medição Aplicada a Redes Neurais Artificiais; 6. Resultados Experimentais; 7. Conclusões e Trabalhos Futuros. I. Barbosa, Carlos Roberto Hall. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação. III. Título.

CDD: 389.1

Agradecimentos

Aos familiares que sempre me incentivaram no meu crescimento pessoal e profissional, infelizmente alguns não estão mais presentes para presenciar mais uma realização.

Em especial a minha mãe pela paciência e preocupação durante a extensão de minha carreira.

À Endesa e ao programa de P&D da Aneel que financiaram este curso.

Ao Diretor técnico da Endesa Geração José Ignácio Pires pela oportunidade e ao Gerente e Amigo Paulo Roberto Maisonnave pelo incentivo e confiança e ao Amigo Giovani Ribeiro pelas sugestões e trocas de experiências.

Aos Professores Carlos Hall, Fátima Ludovico e aos Amigos Mestres Eduardo Costa da Silva, Fabio Rocha Barbosa e Raymundo Aragão.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para o resultado desta dissertação.

Resumo

Gusman, Christiane Sampaio de Almeida; Barbosa, Carlos Roberto Hall. **Incerteza de Medição em Redes Neurais Artificiais Aplicadas à Manutenção Preditiva de Transformadores.** Rio de Janeiro, 2011. 126 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação (PósMQI), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Diversas pesquisas sobre monitoramento e diagnóstico de equipamentos do sistema elétrico foram iniciadas com o objetivo de elevar a garantia e confiabilidade no sistema. Autores, não somente no Brasil, desenvolveram pesquisas sobre o tema, dentre eles (Bengtson, 1996; Kovacevic & Dominelli, 2003; Freitas, 2000). O objetivo é garantir a confiabilidade dos equipamentos instalados e incrementar o desempenho aumentando a vida útil dos mesmos. Nesse contexto (Freitas, 2000; Cavaleiro, 2003; dentre outros) discorrem sobre o tema. As redes neurais artificiais são utilizadas como uma das possíveis ferramentas disponíveis para análise, diagnóstico e monitoramento de equipamentos. A inovação deste trabalho está em apresentar uma nova metodologia desenvolvida para analisar a propagação das incertezas de medição das variáveis de entrada em redes neurais artificiais aplicadas à Manutenção Preditiva de Transformadores. Com base nos conceitos da metrologia foram analisados não somente os dados de entrada como também a incerteza de medição associadas aos mesmos. O método desenvolvido permite que se estime a incerteza de medição das variáveis de saída, contribuindo para a avaliação da confiabilidade de modelagens baseadas em redes neurais. Também foi realizado um estudo de caso, no qual se avaliou a propagação das incertezas de medição em sete redes neurais destinadas a estimar a concentração dos gases (saídas das redes) dissolvidos no óleo de transformadores de potência, com base nas características físico-químicas do óleo (variáveis de entrada). A metodologia utilizada baseou-se na introdução de perturbações na

entrada das redes analisadas e na consequente análise de como estas perturbações afetam a saída das redes, permitindo-se assim calcular os coeficientes de sensibilidade de cada entrada. Em seguida, combinando-se as incertezas de medição das variáveis de entrada (disponíveis nos certificados de calibração dos instrumentos utilizados nas respectivas medições), por meio dos coeficientes de sensibilidade, é possível estimar a incerteza de medição das variáveis de saída.

Palavras chave

Incerteza de Medição; Metrologia, Redes Neurais; Propagação da Incerteza.

Abstract

Gusman, Christiane Sampaio de Almeida; Barbosa, Carlos Roberto Hall (Advisor). **Uncertainty of Measurement in Artificial Neural Networks Applied on the Preventative Maintenance of Transformers**. Rio de Janeiro, 2011. 126p. MSc. Dissertation – Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação (PósMQI), Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Research about monitoring and diagnostics of electrical system equipment was initiated with the objective of upgrading the guarantee and trust of a system. Authors, not only in Brazil, have developed research about the subject, among them (Bengtson, 1996; Kovacevic & Dominelli, 2003; Freitas, 2000). The objective is to guarantee the confidence in the equipment installed and enhance the performance and increase the durability of the equipment. Within this context (Freitas, 2000; Cavaleiro, 2003; among others) talk about this subject. The artificial Neural Networks are used as one of the possible available tools for analysis, diagnostics and monitoring of equipment. The innovation of this paper is to present a new methodology developed to analyze the propagation of uncertainty measurement variables of input in artificial neural networks applied to predictive maintenance of transformers. Based on the concepts of metrology, not only the input data was analyzed but also the uncertainty measurements that were associated with the equipment. The method that was developed allows us to estimate the measurement of uncertainty of output variables, contributing to the evaluation of confidence of models based on neural networks. There was also a case study, in which the propagation of uncertainties of measurement were evaluated within seven designated neural networks to estimate the concentration of gases (output of the networks) dissolved in potency transformer oil, based on the physical-chemical characteristics of

the oil (input variables). The methodology that was utilized was based on the introduction of perturbation at the input of the networks that were analyzed and the consequent analysis of how these perturbation affect the output of the networks, this way allowing the calculation of the coefficients of sensibility of each entry. Then we match the input variables of the uncertainty measurements (available on the calibration certificates of the instruments utilized on the respective measurements), through the coefficients of sensibility, it is possible to estimate the output variables of the uncertainty measurements.

Keywords

Uncertainty of Measurements; Metrology; Neural Networks; Propagation of Uncertainty.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Metodologia	17
1.2	Definição do Problema de Pesquisa	17
1.3	Objetivos: Geral e Específicos	18
1.4	Motivação	18
1.5	Estrutura da Dissertação	19
2	MANUTENÇÃO PREDITIVA DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA	20
2.1	Metodologias de Manutenção	20
2.1.1	Evolução Histórica da Função Manutenção	21
2.1.2	Conceitos e Objetivos da Manutenção	21
2.1.3	Principais Diferenças entre os Sistemas de Manutenção Disponíveis	22
2.1.4	Manutenção Preditiva	23
2.1.5	Especificando a Manutenção Preditiva	23
2.1.6	Etapas do Processo de Implantação da Manutenção Preditiva	24
2.2	Transformadores	25
2.2.1	Resfriamento dos Transformadores	26
2.2.2	Efeitos Térmicos em Transformadores de Potência	27
2.2.3	Óleo Utilizado para Refrigeração dos Transformadores	27
2.2.4	Decomposição do Óleo Mineral	28
2.2.5	Análise de Óleo dos Transformadores	30
2.2.6	Propriedades Elétricas Encontradas no Óleo de Transformadores	33
2.2.7	Procedimentos de Detecção e Análise dos Gases	35
2.2.8	Fontes não Usuais de Geração de Gases	36
2.3	Análise de Gases Dissolvidos (DGA)	38
2.3.1	Método do Gás-Chave	39
2.3.2	Método de Rogers	40
2.3.3	Método de Dörnenburg	41

2.3.4	Método do Triângulo de Duval	42
2.3.5	Método Previsto na NBR 7274 – IEC 599	43
2.4	Métodos de Análise de Óleo	45
3	REDES NEURAS ARTIFICIAIS	47
3.1	Histórico das Redes Neurais Artificiais	48
3.2	O Neurônio Artificial	50
3.3	Topologia da Rede Perceptrons de Múltiplas Camadas – MLP	52
3.4	Aprendizado	53
3.5	Função Analítica de uma Rede Neural	55
4	CONCEITOS DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO	58
4.1	Metrologia	59
4.2	Definições do VIM - Vocabulário Internacional de Metrologia	60
4.3	Órgãos de Acreditação	62
4.4	Conceitos de Medição	65
4.4.1	Valor Verdadeiro	66
4.4.2	Erro de Medição	67
4.4.3	Incerteza de Medição - NBR ISO/IEC 17025	70
4.4.4	Análise da Incerteza de Medição	72
4.4.5	Avaliação Tipo A de Incerteza	72
4.4.6	Avaliação Tipo B de Incerteza	73
4.4.7	Variância	73
4.4.8	Desvio Padrão	73
4.4.9	Desvio Padrão do Valor Médio	74
4.4.10	Distribuição Normal ou de Gauss	75
5	PROPAGAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO EM REDES NEURAS ARTIFICIAIS	76
5.1	Introdução de Incerteza de Medição Aplicada a Redes Neurais	76
5.2	Variáveis Estatisticamente Dependentes	77
5.3	Variáveis Estatisticamente Independentes	78
5.4	Propagação da Incerteza de Medição	79
5.5	Incerteza de Medição em Redes Neurais	80
5.5.1	Incerteza de Medição em Redes Neurais – Método Analítico	80
5.5.2	Incerteza de Medição em Redes Neurais – Método Numérico	84

6	RESULTADOS	86
6.1	Redes Neurais para Estimção da Concentrao de Gases	87
6.2	Propagao da Incerteza de Mediao nas Redes Neurais para Estimao da Concentrao de Gases	96
7	CONCLUSOES E TRABALHOS FUTUROS	104
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
	ANEXO - I	119

Lista de Figuras

Figura 1- Exemplo do Interior de um Transformador de Potência	26
Figura 2 – Transformador de Potência (Benedet, 2008)	27
Figura 3 – Formação dos Gases em Função da Temperatura de Decomposição. a) Pressão x Temperatura b) Concentração dos Gases x Temperatura (Lima, 2006).....	30
Figura 4 – Triângulo de Durval (Barbosa, 2008).....	43
Figura 5 – Modelo de Análise Físico Química (ABNT, 1991)	46
Figura 6 - Esquema de uma Célula Neural	47
Figura 7 - Ilustra o Modelo Não Linear de um Neurônio (Haykin, 2001)	49
Figura 8 - Modelo Não Linear de um Neurônio (Haykin, 1994).....	51
Figura 9– Fluxograma do Processo de Treinamento da Rede	54
Figura 10 – Rede Neural Modelo Multi-Layer Perceptron	56
Figura 11 - Hierarquia de Calibração do Padrão Nacional até o Produto Final (Gonçalves, 2005)	63
Figura 12 – Rastreabilidade de Padrões (Ribeiro, 1999)	65
Figura 13 – Fontes de Incerteza da Medição (Fidélis, 1999).....	66
Figura 14 – Sequência da Incerteza de Medição (Ribeiro, 1999)	68
Figura 15 – Fluxograma do Processo de Estimativa da Incerteza de Medição.....	69
Figura 16 - Desvio Padrão das Médias	74
Figura 17 - Distribuição Normal ou de Gauss.....	75
Figura 18 - Fluxograma de Análise da Incerteza (Joni, 2009)	80
Figura 19 – Rede Neural Modelo Perceptron Mult-Layer	82
Figura 20– Comparação entre as Saídas das Redes Neurais, Utilizadas para Modelar a Concentração dos Gases, e seus Respectiveos <i>Targets</i> . (a) Metano, (b) Dióxido de Carbono, (c) Acetileno e (d) Etileno.	92
Figura 21 – Comparação entre as Saídas das Redes Neurais, Utilizadas para Modelar a Concentração dos Gases, e seus Respectiveos <i>Targets</i> . (a) Hidrogênio, (b) Etano, (c) Monóxido de Carbono.	93
Figura 22 – Comparação entre a Saída da Rede Neural, Utilizada para Modelar a Concentração de Acetileno e seus Respectiveos <i>Targets</i> . Zoom na Vizinhança de 0 ppm.	94

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Concentração de solubilização de gases (Messias, 1993).....	35
Tabela 2 – Relação de Gases Conforme Método de Rogers	40
Tabela 3 – Combinações de Possíveis Diagnósticos	41
Tabela 4 – Método de Falhas Seguindo o Modelo de Dörnenburg	42
Tabela 5 – Limites de Concentração de Gases para Validação	42
Tabela 6 – Diagnóstico do Transformador de Potência pelo Método.....	44
Tabela 7 – Relação entre os Gases (ABNT, 1992).....	44
Tabela 8 - Funções de Ativação.....	52
Tabela 9 – Variáveis de Entrada Disponíveis para as Redes Neurais,	88
Tabela 10 – Composição do Conjunto de Variáveis de Entrada Disponíveis.....	88
Tabela 11 – Dados da Rede Neural Desenvolvida para o Experimento	90
Tabela 12 – Composição do Conjunto de Variáveis de Saída Disponíveis.....	90
Tabela 13 – Cálculo do RMSE das Redes Treinadas por	95
Tabela 14 – Perturbação da Rede.....	96
Tabela 15 – Cálculo da Incerteza da Rede	98
Tabela 16 – Incerteza Combinada das Variáveis de Entrada.....	100
Tabela 17- Apresenta os Resultados da Aplicação do Método de Propagação das Incertezas, Introduzido na Seção 3, a cada uma das Sete Redes Neurais Apresentadas acima - Metano, Dióxido de Carbono, Acetileno, Etileno, Hidrogênio, Etano, Monóxido de Carbono.	102

Lista de Siglas e Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANFIS	Sistema Adaptativo de Inferência Neuro- Nebuloso
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BIPM	Bureau Internacional de Pesos e Medidas
BP	<i>Back-Propagation</i>
CH ₄	Metano
C ₂ H ₂	Acetileno
C ₂ H ₄	Etileno
C ₂ H ₆	Etano
Conmetro	Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
CIPM	Comitê Internacional de Pesos e Medidas
CGPM	Conferência Geral de Pesos e Medidas
CNI	Confederação Nacional da Indústria,
CNC	Confederação Nacional do Comércio
DGA	Análise de Gases Dissolvidos em Óleo
DP	Descargas Parciais
EQM	Erro Quadrático Médio
H ₂	Hidrogênio
IDEC	Instituto de Defesa do Consumidor.
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IMGC	<i>Istituto di Metrologia G. Colonnetti</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISO GUM	<i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i>
LM	<i>Levenberg-Marquardt</i>
MLP	Perceptron de Múltiplas Camadas

N ₂	Nitrogênio
NBR	Norma Brasileira
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i> (EUA)
NRLM	<i>National Research Laboratory of Metrology</i>
O ₂	Oxigênio
PPM	Partes Por Milhão
PTB	<i>Physikalisch Technische Bundesanstalt</i>
R1	Razão CH ₄ /H ₂
R2	Razão C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄
R3	Razão C ₂ H ₂ /CH ₄
R4	Razão C ₂ H ₆ /C ₂ H ₂
R5	Razão C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆
R6	Razão CO ₂ /CO
RBF	Funções de Base Radial
RDG	Regra Delta Generalizada
RNA	Redes Neurais Artificiais
RM	Resultado da Medição
RMSE	<i>(Root Mean Square Error)</i> Raiz do Erro Quadrático Médio
SI	Sistema Internaciona de Unidades
SM	Sistema de Medição
Sinmetro	Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial.
TAN δ	Tangente de Perda ou Fator de Dissipação
USP	Universidade de São Paulo
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial