UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PAULO IZIDIO DA COSTA

Sistema inteligente para localização de
descargas parciais em transformadores de
potência.

São Carlos
2015

PAULO IZIDIO DA COSTA

SISTEMA INTELIGENTE PARA LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, sendo parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Engenharia Elétrica.

Área de Concentração em Sistemas Dinâmicos.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino

São Carlos
2015

Trata-se da versão corrigida da dissertação. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

C837s Costa, Paulo Izídio da
Sistema Inteligente Para Localização de Descargas Parciais em Transformadores de Potência / Paulo Izídio da Costa; orientador Rogério Andrade Flauzino. São Carlos, 2015.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Processamento de Sinais e Instrumentação -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2015.

1. Transformadores de Potência. 2. Sistemas Inteligentes. 3. Descargas Parciais. 4. Redes Neurais Artificiais. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **PAULO IZIDIO DA COSTA.**

Título da dissertação: "Sistema inteligente para localização de descargas parciais em transformadores de potência".

Data da defesa: 27/11/2015

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Rogério Andrade Flauzino**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Falcondes José Mendes de Seixas**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP – Ilha Solteira)

Aprovado

Prof. Dr. **Fabricao Guimarães Baptista**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP – Bauru)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

HOMENAGEM A DEUS

Pelo dom precioso de nossas vidas, que recebemos de presente e pelas quais somos responsáveis;

Pelos braços perfeitos, olhos resplandecentes, vozes que cantam mãos que trabalham;

Por poder amar, viver, sorrir, sonhar;

Por crer em Ti, quando há tantos que não têm a esperança de uma crença;

Por ter nos dado a força para vencer obstáculos e chegar ao fim de mais uma jornada;

Enfim, por ter tão pouco a pedir, tanto a oferecer e muito a agradecer.

AGRADECIMENTOS

A minha esposa Márcia e aos meus filhos Vinícius e Guilherme pelo apoio e compreensão pelas horas em que estive ausente para cumprir esta jornada, a vocês o meu amor e gratidão.

Aos meus pais Mauro da Costa (em nossos corações) e Geny Modesto da Costa, por todo apoio e incentivo.

Ao Orientador Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino por influenciar em minha formação, pelo apoio e orientação deste trabalho e pela grande amizade.

Ao Prof. Dr. Ivan Nunes da Silva o pelos ensinamentos, pela grande ajuda e cooperação, e pela grande amizade.

Ao amigo Edson Aparecido Goes pelo apoio e contribuição, grato pela disponibilidade e companheirismo.

Aos amigos Carlos Guilherme, Eduardo Navarro, Marcelo Carrapato e Thiago Bonfim que colaboraram e incentivaram minha participação nesta pesquisa acadêmica.

Agradeço ainda aos amigos e colegas da CTEEP (Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista) que, de forma direta e indireta, ajudaram na conclusão deste trabalho.

Agradeço a empresa CTEEP (Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista) pela oportunidade de participar desse projeto.

E a todos que se alegraram com essa conquista.

RESUMO

COSTA, P. I. (2015). *Sistema Inteligente para Localização de Descargas Parciais em Transformadores de Potência*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2015.

O crescente aumento na demanda de energia elétrica nacional, associada às alterações regulamentares do setor, em que o tempo que um equipamento permanece indisponível para o sistema, aguardando manutenção significa perda de receita para as companhias de energia, motivou a busca por diagnósticos precisos e utilização de técnicas não invasivas que possam ser aplicadas em transformadores em serviço. Assim, o foco desta pesquisa foi o desenvolvimento de uma arquitetura de sistema inteligente baseado em Redes Neurais Artificiais, que a partir de características extraídas de sinais de emissão acústicas provenientes de sensores distribuídos espacialmente no tanque de transformadores de potência, possa identificar internamente o local de ocorrência das descargas parciais e fornecer as distâncias estimadas entre os sensores e o ponto dessa descarga, e com essas distâncias, utilizando técnicas numéricas de triangulação, o sistema fornece também a coordenada espacial da falha auxiliando no diagnóstico de defeito do transformador e no processo de tomada de decisões.

Palavras-Chave: Transformadores de Potência, Sistemas Inteligentes, Descargas Parciais, Redes Neurais Artificiais.

ABSTRACT

COSTA, P. I. (2015). Intelligent System for Location of Partial Discharge in Power Transformers. Dissertation (Master's Degree) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2015.

The increasing in the demand for national electrical energy coupled with alterations in the regulation of the sector, where the time which a piece of the electrical system equipment stays out of service means loss of income for the electrical companies, has motivated the search for correct diagnostics and usage of non-invasive technics that can be used in transformers which are in operation. Therefore, the aim of this research was to develop the design of an intelligent system based on Artificial Neural Nets, which through the characteristics extracted from the acoustic emission signals coming from the sensors spatially distributed in the power transformer tank can identify internally the place of the occurrence of the partial discharges and provide the estimate distances between the sensors and the discharges point, so with these distances using triangle technical analysis the system will also provide the spatial coordinate of the flaw for diagnosing the problem with the transformer and help the process of decision making.

Keywords: Power Transformer, Intelligent System, Partial Discharge, Artificial Neural Networks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Medição do tipo Bridge para realização do ensaio TTR.....	19
Figura 2.2 – Sistema protótipo para ensaios de transformadores de potência proposto por ZHU, S. P.; SHI, J.; LIM, Y. S.; TAN, C. I.; CHEONG, Y. K.	22
Figura 2.3 – Diagrama de conexão para ensaio de tensão induzida de curta duração para transformadores com enrolamento uniformemente isolado.	24
Figura 2.4 – Diagrama temporal para ensaios de tensão induzida de curta duração.	25
Figura 2.5 – Diagrama de conexão para ensaio de tensão induzida de curta duração para transformadores com enrolamento não- uniformemente isolado.....	26
Figura 2.6 – Diagrama temporal para ensaios de tensão induzida de longa duração.	27
Figura 2.7 – Diagrama temporal para ensaios de tensão induzida durante adeteção de descargas parciais.	28
Figura 2.8 – Diagrama esquemático para medição de tensão induzida com descargas parciais.....	29
Figura 2.9 – Sistema protótipo para ensaios de transformadores de potência proposto.....	30
Figura 2.10 – Sistema protótipo para ensaios de transformadores de potência proposto por MOHSENI, H.; AKMAL, A. S.; JADIDIAN, J.; HASHEMI, E.; AGHEB, E.; NAIENY, A.; GHORBANDAEIPOUR, A.; NIAYESH, K.,	31
Figura 3.1 – Diagrama de blocos do sistema de monitoramento de sinais acústicos.	34
Figura 3.2 – Disposição dos sensores de emissão acústica fixados ao lado de fora do tanque experimental.....	34
Figura 3.3 – Diagrama (layout) para indicação de posicionamento de sensores de emissão acústica.....	35
Figura 3.4 – Variação de posições das descargas frente às posições X (a), Y (b) e Z (c).....	36

Figura 3.5 – Layout de experimento realizado no tanque experimental.	37
Figura 3.6 – Sinais de emissão acústica aqusitados pelos sensores S1, S2, S3 e S4.....	37
Figura 3.7 – Sinais de emissão acústica aqusitados pelos sensores S5, S6, S7 e S8.....	38
Figura 3.8 – Parâmetros extraídos dos sinais acústicos.	39
Figura 4.1 – Representação das topologias avaliadas para redes com uma camada neural escondida.	47
Figura 4.2 – Resultado do treinamento nº 1 para uma camada neural escondida (ciclo 1).....	52
Figura 4.3 – Resultado do treinamento nº 2 para uma camada neural escondida (ciclo 1).....	52
Figura 4.4 – Resultado do treinamento nº 3 para uma camada neural escondida (ciclo 1).....	53
Figura 4.5 – Resultado do treinamento nº 4 para uma camada neural escondida (ciclo 1).....	53
Figura 4.6– Resultado do treinamento nº 5 para uma camada neural escondida (ciclo 1).....	54
Figura 4.7 – Resultado do treinamento nº 6 para uma camada neural escondida (ciclo 1).....	54
Figura 4.8 – Resultado do treinamento nº 7 para uma camada neural escondida (ciclo 1).....	55
Figura 4.9 – Resultado do treinamento nº 8 para uma camada neural escondida (ciclo 1).....	55
Figura 4.10 – Resultado do treinamento nº 9 para uma camada neural escondida (ciclo 1).....	56
Figura 4.11 – Resultado do treinamento nº 10 para uma camada neural escondida (ciclo 1).....	56
Figura 4.12 – Resultado do treinamento nº 11 para uma camada neural escondida (ciclo 1).....	57
Figura 4.13 – Resultado do treinamento nº 12 para uma camada neural escondida (ciclo 1).....	57
Figura 4.14 – Resultado do treinamento nº 13 para uma camada neural escondida (ciclo 1).....	58

Figura 4.15 – Resultado do treinamento nº 14 para uma camada neural escondida (ciclo 1).	58
Figura 4.16 – Resultado do treinamento nº 15 para uma camada neural escondida (ciclo 1).	59
Figura 4.17 – Resultado do treinamento nº 16 para uma camada neural escondida (ciclo 1).	59
Figura 4.18 – Resultado do treinamento nº 17 para uma camada neural escondida (ciclo 1).	60
Figura 4.19 – Resultado do treinamento nº 18 para uma camada neural escondida (ciclo 1).	60
Figura 4.20 – Resultado do treinamento nº 19 para uma camada neural escondida (ciclo 1).	61
Figura 4.21 – Resultado do treinamento nº 20 para uma camada neural escondida (ciclo 1).	61
Figura 4.22 – Resultado do treinamento nº 21 para uma camada neural escondida (ciclo 1).	62
Figura 4.23 – Resultado do treinamento nº 22 para uma camada neural escondida (ciclo 1).	62
Figura 4.24 – Resultado do treinamento nº 23 para uma camada neural escondida (ciclo 1).	63
Figura 4.25 – Resultado do treinamento nº 24 para uma camada neural escondida (ciclo 1).	63
Figura 4.26 – Resultado do treinamento nº 25 para uma camada neural escondida (ciclo 1).	64
Figura 4.27 – Resultado do treinamento nº 26 para uma camada neural escondida (ciclo 1).	64
Figura 4.28 – Resultado do treinamento nº 27 para uma camada neural escondida (ciclo 1).	65
Figura 4.29 – Resultado do treinamento nº 28 para uma camada neural escondida (ciclo 1).	65
Figura 4.30 – Resultado do treinamento nº 29 para uma camada neural escondida (ciclo 1).	66
Figura 4.31 – Resultado do treinamento nº 30 para uma camada neural escondida (ciclo 1).	66

Figura 4.32 – Resultado do treinamento nº 31 para uma camada neural escondida (ciclo 1).....	67
Figura 4.33 – Resultado do treinamento nº 32 para uma camada neural escondida (ciclo 1).....	67
Figura 4.34 – Resultado do treinamento nº 33 para uma camada neural escondida (ciclo 1).....	68
Figura 4.35 – Resultado do treinamento nº 34 para uma camada neural escondida (ciclo 1).....	68
Figura 4.36 – Resultado do treinamento nº 35 para uma camada neural escondida (ciclo 1).....	69
Figura 4.37 – Resultado do treinamento nº 36 para uma camada neural escondida (ciclo 1).....	69
Figura 4.38 – Resultado do treinamento nº 37 para uma camada neural escondida (ciclo 1).....	70
Figura 4.39 – Resultado do treinamento nº 38 para uma camada neural escondida (ciclo 1).....	70
Figura 4.40 – Resultado do treinamento nº 39 para uma camada neural escondida (ciclo 1).....	71
Figura 4.41 – Performance geral do primeiro ciclo de treinamento para uma camada neural escondida	72
Figura 4.42 – Resultado do treinamento nº 1 para uma camada neural escondida (ciclo 2).....	73
Figura 4.43 – Resultado do treinamento nº 2 para uma camada neural escondida (ciclo 2).....	73
Figura 4.44 – Resultado do treinamento nº 3 para uma camada neural escondida (ciclo 2).....	74
Figura 4.45 – Resultado do treinamento nº 4 para uma camada neural escondida (ciclo 2).....	74
Figura 4.46 – Resultado do treinamento nº 5 para uma camada neural escondida (ciclo 2).....	75
Figura 4.47 – Resultado do treinamento nº 6 para uma camada neural escondida (ciclo 2).....	75
Figura 4.48 – Resultado do treinamento nº 7 para uma camada neural escondida (ciclo 2).....	76

Figura 4.49 – Resultado do treinamento nº 8 para uma camada neural escondida (ciclo 2).	76
Figura 4.50 – Resultado do treinamento nº 9 para uma camada neural escondida (ciclo 2).	77
Figura 4.51 – Resultado do treinamento nº 10 para uma camada neural escondida (ciclo 2).	77
Figura 4.52 – Resultado do treinamento nº 11 para uma camada neural escondida (ciclo 2).	78
Figura 4.53 – Resultado do treinamento nº 12 para uma camada neural escondida (ciclo 2).	78
Figura 4.54 – Resultado do treinamento nº 13 para uma camada neural escondida (ciclo 2).	79
Figura 4.55 – Resultado do treinamento nº 14 para uma camada neural escondida (ciclo 2).	79
Figura 4.56 – Resultado do treinamento nº 15 para uma camada neural escondida (ciclo 2).	80
Figura 4.57 – Resultado do treinamento nº 16 para uma camada neural escondida (ciclo 2).	80
Figura 4.58 – Resultado do treinamento nº 17 para uma camada neural escondida (ciclo 2).	81
Figura 4.59 – Resultado do treinamento nº 18 para uma camada neural escondida (ciclo 2).	81
Figura 4.60 – Resultado do treinamento nº 19 para uma camada neural escondida (ciclo 2).	82
Figura 4.61 – Resultado do treinamento nº 20 para uma camada neural escondida (ciclo 2).	82
Figura 4.62 – Resultado do treinamento nº 21 para uma camada neural escondida (ciclo 2).	83
Figura 4.63 – Resultado do treinamento nº 22 para uma camada neural escondida (ciclo 2).	83
Figura 4.64 – Resultado do treinamento nº 23 para uma camada neural escondida (ciclo 2).	84
Figura 4.65 – Resultado do treinamento nº 24 para uma camada neural escondida (ciclo 2).	84

Figura 4.66 – Resultado do treinamento nº 25 para uma camada neural escondida (ciclo 2).....	85
Figura 4.67 – Resultado do treinamento nº 26 para uma camada neural escondida (ciclo 2).....	85
Figura 4.68 – Resultado do treinamento nº 27 para uma camada neural escondida (ciclo 2).....	86
Figura 4.69 – Resultado do treinamento nº 28 para uma camada neural escondida (ciclo 2).....	86
Figura 4.70 – Resultado do treinamento nº 29 para uma camada neural escondida (ciclo 2).....	87
Figura 4.71 – Resultado do treinamento nº 30 para uma camada neural escondida (ciclo 2).....	87
Figura 4.72 – Resultado do treinamento nº 31 para uma camada neural escondida (ciclo 2).....	88
Figura 4.73 – Resultado do treinamento nº 32 para uma camada neural escondida (ciclo 2).....	88
Figura 4.74 – Resultado do treinamento nº 33 para uma camada neural escondida (ciclo 2).....	89
Figura 4.75 – Resultado do treinamento nº 34 para uma camada neural escondida (ciclo 2).....	89
Figura 4.76 – Resultado do treinamento nº 35 para uma camada neural escondida (ciclo 2).....	90
Figura 4.77 – Resultado do treinamento nº 36 para uma camada neural escondida (ciclo 2).....	90
Figura 4.78 – Resultado do treinamento nº 37 para uma camada neural escondida (ciclo 2).....	91
Figura 4.79 – Resultado do treinamento nº 38 para uma camada neural escondida (ciclo 2).....	91
Figura 4.80 – Resultado do treinamento nº 39 para uma camada neural escondida (ciclo 2).....	92
Figura 4.81 – Performance geral de treinamento para redes com uma camada neural escondida (ciclo 2).....	93
Figura 4.82 – Representação das topologias avaliadas para redes com duas camadas neurais escondidas.	94

Figura 4.83 – Resultado do treinamento nº 1 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).....	95
Figura 4.84 – Resultado do treinamento nº 2 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).....	95
Figura 4.85 – Resultado do treinamento nº 3 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).....	96
Figura 4.86 – Resultado do treinamento nº 4 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).....	96
Figura 4.87 – Resultado do treinamento nº 5 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).....	97
Figura 4.88 – Resultado do treinamento nº 6 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).....	97
Figura 4.89 – Resultado do treinamento nº 7 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).....	98
Figura 4.90 – Resultado do treinamento nº 8 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).....	98
Figura 4.91 – Resultado do treinamento nº 9 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).....	99
Figura 4.92 – Resultado do treinamento nº 10 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).....	99
Figura 4.93 – Resultado do treinamento nº 11 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).....	100
Figura 4.94 – Resultado do treinamento nº 12 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).....	100
Figura 4.95 – Resultado do treinamento nº 13 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).....	101
Figura 4.96 – Resultado do treinamento nº 14 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).....	101
Figura 4.97 – Resultado do treinamento nº 15 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).....	102
Figura 4.98 – Resultado do treinamento nº 16 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).....	102
Figura 4.99 – Resultado do treinamento nº 17 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).....	103

Figura 4.100 – Resultado do treinamento nº 18 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).	103
Figura 4.101 – Resultado do treinamento nº 19 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).	104
Figura 4.102 – Resultado do treinamento nº 20 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).	104
Figura 4.103 – Resultado do treinamento nº 21 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).	105
Figura 4.104 – Resultado do treinamento nº 22 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).	105
Figura 4.105 – Resultado do treinamento nº 23 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).	106
Figura 4.106 – Resultado do treinamento nº 24 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).	106
Figura 4.107 – Resultado do treinamento nº 25 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).	107
Figura 4.108 – Resultado do treinamento nº 26 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).	107
Figura 4.109 – Resultado do treinamento nº 27 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).	108
Figura 4.110 – Resultado do treinamento nº 28 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).	108
Figura 4.111 – Resultado do treinamento nº 29 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).	109
Figura 4.112 – Resultado do treinamento nº 30 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).	109
Figura 4.113 – Resultado do treinamento nº 31 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).	110
Figura 4.114 – Resultado do treinamento nº 32 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).	110
Figura 4.115 – Resultado do treinamento nº 33 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).	111
Figura 4.116 – Resultado do treinamento nº 34 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).	111

Figura 4.117 – Resultado do treinamento nº 35 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).....	112
Figura 4.118 – Resultado do treinamento nº 36 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).....	112
Figura 4.119 – Resultado do treinamento nº 37 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).....	113
Figura 4.120 – Resultado do treinamento nº 38 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).....	113
Figura 4.121 – Resultado do treinamento nº 39 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).....	114
Figura 4.122 – Resultado do treinamento nº 40 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).....	114
Figura 4.123 – Resultado do treinamento nº 41 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).....	115
Figura 4.124 – Resultado do treinamento nº 42 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).....	115
Figura 4.125 – Performance geral de treinamento para redes com duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).	116
Figura 4.126 – Resultado do treinamento nº 1 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).....	117
Figura 4.127 – Resultado do treinamento nº 2 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).....	117
Figura 4.128 – Resultado do treinamento nº 3 para duas camadas neurais escondidas.	118
Figura 4.129 – Resultado do treinamento nº 4 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).....	118
Figura 4.130– Resultado do treinamento nº 5 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).....	119
Figura 4.131 – Resultado do treinamento nº 6 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).....	119
Figura 4.132 – Resultado do treinamento nº 7 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).....	120
Figura 4.133 – Resultado do treinamento nº 8 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).....	120

Figura 4.134 – Resultado do treinamento nº 9 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).	121
Figura 4.135 – Resultado do treinamento nº 10 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).	121
Figura 4.136 – Resultado do treinamento nº 11 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).	122
Figura 4.137 – Resultado do treinamento nº 12 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).	122
Figura 4.138 – Resultado do treinamento nº 13 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).	123
Figura 4.139 – Resultado do treinamento nº 14 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).	123
Figura 4.140 – Resultado do treinamento nº 15 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).	124
Figura 4.141 – Resultado do treinamento nº 16 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).	124
Figura 4.142 – Resultado do treinamento nº 17 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).	125
Figura 4.143 – Resultado do treinamento nº 18 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).	125
Figura 4.144 – Resultado do treinamento nº 19 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).	126
Figura 4.145 – Resultado do treinamento nº 20 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).	126
Figura 4.146 – Resultado do treinamento nº 21 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).	127
Figura 4.147 – Resultado do treinamento nº 22 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).	127
Figura 4.148 – Resultado do treinamento nº 23 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).	128
Figura 4.149 – Resultado do treinamento nº 24 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).	128
Figura 4.150 – Resultado do treinamento nº 25 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).	129

Figura 4.151 – Resultado do treinamento nº 26 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).....	129
Figura 4.152 – Resultado do treinamento nº 27 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).....	130
Figura 4.153 – Resultado do treinamento nº 28 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).....	130
Figura 4.154 – Resultado do treinamento nº 29 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).....	131
Figura 4.155 – Resultado do treinamento nº 30 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).....	131
Figura 4.156 – Resultado do treinamento nº 31 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).....	132
Figura 4.157 – Resultado do treinamento nº 32 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).....	132
Figura 4.158 – Resultado do treinamento nº 33 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).....	133
Figura 4.159 – Resultado do treinamento nº 34 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).....	133
Figura 4.160 – Resultado do treinamento nº 35 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).....	134
Figura 4.161 – Resultado do treinamento nº 36 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).....	134
Figura 4.162 – Resultado do treinamento nº 37 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).....	135
Figura 4.163 – Resultado do treinamento nº 38 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).....	135
Figura 4.164 – Resultado do treinamento nº 39 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).....	136
Figura 4.165 – Resultado do treinamento nº 40 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).....	136
Figura 4.166 – Resultado do treinamento nº 41 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).....	137
Figura 4.167 – Resultado do treinamento nº 42 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).....	137

Figura 4.168 – Performance geral para treinamentos de redes neurais de duas camadas escondidas (ciclo 2).	138
Figura 4.169 –Representação da função da energia da onda elástica.	139
Figura 4.170 – Representação gráfica do ponto de maior energia da Descarga Parcial.	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Recomendações para ensaios em transformadores de potência com isolamento a óleo.	7
Tabela 2.2 – Identificação do óleo isolante pelo percentual de hidrocarbonetos.	10
Tabela 2.3 – Normas a serem aplicadas nos ensaios do óleo isolante.	13
Tabela 2.4 – Perfis típicos de composição frente à ocorrência de falhas.	15
Tabela 2.5 – Identificação de falhas através do método de Dornenburg.	16
Tabela 2.6 – Identificação de falhas através do método de Rogers.	17
Tabela 2.7 – Análise dos resultados obtidos por meio de ensaio TTR.	18
Tabela 2.8 – Características do transformador utilizado por ZHU, S. P.; SHI, J.; LIM, Y. S.; TAN, C. I.; CHEONG, Y. K.	22
Tabela 2.9 – Resultados obtidos por ZHU, S. P.; SHI, J.; LIM, Y. S.; TAN, C. I.; CHEONG, Y. K. para o ensaio de relação de espiras.	23
Tabela 3.1 – Exemplo de sinal de emissão acústica adquirido pelo modo de aquisição.	41
Tabela 3.2 – Exemplo de dados pré-processados.	42

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO À DISSERTAÇÃO DE MESTRADO.....	1
1.1. INTRODUÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	2
1.3. CONTRIBUIÇÕES ACADÊMICAS	2
1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO	2
CAPÍTULO 2 PRINCIPAIS ASPECTOS RELACIONADOS AOS ENSAIOS DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA VISANDO A DETECÇÃO DE FALHAS.....	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. ENSAIOS REALIZADOS EM ÓLEOS ISOLANTES	8
2.3. DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM TRANSFORMADORES UTILIZANDO ANÁLISE DE GASES DISSOLVIDOS	13
2.3.1. MÉTODO DO GÁS CHAVE	14
2.3.2. MÉTODO DE DORNENBURG	16
2.3.3. MÉTODO DE ROGERS	16
2.4. ENSAIOS DE RELAÇÃO DE ESPIRAS (TTR - TRANSFORMER TURN RATIO).....	18
2.5. ENSAIOS DE TENSÃO INDUZIDA	23
2.5.1. ENSAIOS DE CURTA DURAÇÃO PARA ENROLAMENTO UNIFORMEMENTE ISOLADO.....	24
2.5.2. ENSAIO DE CURTA DURAÇÃO PARA ENROLAMENTO NÃO-UNIFORMEMENTE ISOLADO	25
2.5.3. ENSAIO DE LONGA DURAÇÃO PARA ENROLAMENTO UNIFORME E GRADUAL	26
CAPÍTULO 3 ASPECTOS DE PRÉ-PROCESSAMENTO REALIZADOS NOS ENSAIOS DE DESCARGAS PARCIAIS	33
3.1. INTRODUÇÃO	33

3.2. CÁLCULOS REALIZADOS VISANDO O PRÉ-PROCESSAMENTO DOS SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA ADQUIRIDOS NA ETAPA EXPERIMENTAL	38
3.3. CARACTERÍSTICAS DOS SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA PROVENIENTES DO MÓDULO DE AQUISIÇÃO	40
3.4. TRATAMENTO REALIZADO NOS SINAIS NO DOMÍNIO DO TEMPO	41
CAPÍTULO 4 ASPECTOS DE TREINAMENTO DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS.....	45
4.1. INTRODUÇÃO	45
4.2. METODOLOGIA AUTOMATIZADA DE TREINAMENTO	45
4.3. ESTIMAÇÃO DAS COORDENADAS ESPACIAIS.....	47
4.4. RESULTADOS COMPUTACIONAIS PARA UMA CAMADA NEURAL ESCONDIDA – CICLO 1	51
4.5. RESULTADOS COMPUTACIONAIS PARA UMA CAMADA NEURAL ESCONDIDA – CICLO 2	72
4.6. RESULTADOS COMPUTACIONAIS PARA 2 CAMADAS NEURAIS ESCONDIDAS – CICLO 1.....	94
4.7. RESULTADOS COMPUTACIONAIS PARA 2 CAMADAS NEURAIS ESCONDIDAS – CICLO 2.....	116
4.8. TESTE DE VALIDAÇÃO DE RESULTADO	138
4.9. REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS	139
CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	141
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143

Capítulo 1 INTRODUÇÃO À DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

1.1. INTRODUÇÃO

O crescente aumento da demanda energética nacional, associada às alterações regulamentares do setor elétrico, despertou o interesse e a preocupação com a confiabilidade e a qualidade do fornecimento de energia elétrica. Dentro deste contexto, destaca-se o desenvolvimento de metodologias dedicadas à identificação, localização e predição de falhas referentes a todos os segmentos do sistema elétrico, abrangendo desde o setor da geração, passando pelo setor da transmissão e chegando até o setor da distribuição da energia elétrica.

Em geral, a ocorrência de falhas dentro de cada um destes setores acarreta em efeitos indesejados, tais como a interrupção do fornecimento de energia elétrica e o desencadeamento de perturbações transitórias, que podem danificar equipamentos dos circuitos consumidores, imporem prejuízos econômicos ao sistema produtivo, inutilizar equipamentos do sistema elétrico, afetar quesitos de qualidade de fornecimentos, etc.

Dentre os diversos equipamentos instalados junto ao sistema elétrico, os transformadores de potência destacam-se pela sua importância operacional e por constituírem um ponto crítico do sistema, uma vez que, além de serem responsáveis pela adequação dos níveis de tensão entre a transmissão, ou sub-transmissão, aos níveis de tensão da rede de distribuição primária, são também responsáveis pela transferência de toda energia entre os dois circuitos de acoplamento.

A função de um transformador é a de reduzir as perdas durante as transmissões de energia elétrica causadas pelos diversos fenômenos existentes através da redução da corrente requerida, elevando-se a tensão para transmitir uma determinada potência elétrica.

Os transformadores de potência são um dos equipamentos mais importantes de um sistema de transmissão de energia elétrica, tanto devido a sua finalidade quanto ao elevado custo. Em função da natureza construtiva dos transformadores, quando da ocorrência de um fenômeno eletromagnético, tal equipamento se encontra sujeito a condições extremas que podem resultar em incidência de pontos quentes e movimentação de suas partes ativas. Somando-se a essa possibilidade, têm-se ainda as sobretensões que são observáveis em

muitos fenômenos que ocorrem no setor elétrico. Esses efeitos combinados nas suas diferentes formas desencadeiam um grande número de modos de falhas em transformadores. Quando em operação essas falhas evoluem gradativamente ou intempestivamente, podendo resultar na perda do transformador e indisponibilidade do sistema de transmissão. Além da perda do equipamento, podem ocorrer outros prejuízos de grande gravidade, destacando-se aqueles que atentam para vida humana e outros que decorrem de danos ambientais.

1.2. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

O objetivo desse trabalho é desenvolver um sistema baseado em redes neurais artificiais que, a partir de características extraídas de sinais de emissão acústica de sensores dispostos espacialmente na parte externa do tanque de um transformadores de potência, possa fornecer uma estimativa da distância entre o ponto de ocorrência da descarga parcial e o sensor de emissão acústica. Ainda, de posse das estimativas de distância e da localização espacial dos sensores, desenvolver um algoritmo para estimar as coordenadas espaciais no local provável de ocorrência da descarga parcial.

1.3. CONTRIBUIÇÕES ACADÊMICAS

GONZALES, C.G. ; BONFIN, T.S ; COSTA, P. I. ; SPATTI, D.H ; FLAUZINO, R.A. ; SILVA, I.N. . Efficient Integration of Intelligent Systems and Experimental Tests for Power Transmission Transformer Diagnosis. In: ICAI'13: The 15th International Conference on Artificial Intelligence, 2013, Las Vegas - Nevada. ICAI'13: The 15th International Conference on Artificial Intelligence, 2013.

GONZALES, C.G. ; BONFIN, T.S ; COSTA, P. I. ; SPATTI, D.H ; FLAUZINO, R.A. ; SILVA, I.N. . Expert System for Accurate of Power Transmission Transformer. In: ICAI'13: The 15th International Conference on Artificial Intelligence, 2013, Las Vegas - Nevada. ICAI'13: The 15th International Conference on Artificial Intelligence, 2013.

1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Esta dissertação está organizada de forma a se ter no Capítulo 2 uma descrição sobre os principais aspectos relacionados aos ensaios de transformadores de potência visando

à detecção das falhas internas. No Capítulo 3 são apresentados os aspectos de pré-processamento realizados nos ensaios de descargas parciais por meio de emissão acústica adquiridos na etapa experimental, são destacadas as principais características dos sinais de emissão acústicas que serão processadas pelas Redes Neurais. A metodologia utilizada e os aspectos e resultados obtidos com o treinamento das redes neurais artificiais, bem como os testes e validação dos resultados, e a representação gráfica destes, são tema do Capítulo 4.

Finalmente, no Capítulo 5 as conclusões referentes ao trabalho desenvolvido são apresentadas, assim como algumas proposições sobre a continuidade da pesquisa são tecidas.

Capítulo 2 PRINCIPAIS ASPECTOS RELACIONADOS AOS ENSAIOS DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA VISANDO A DETECÇÃO DE FALHAS

2.1. INTRODUÇÃO

Devido ao crescente aumento da demanda energética nacional, a qual está diretamente associada às alterações regulamentares do setor elétrico, há o crescente interesse e preocupação com relação aos aspectos que dizem respeito à confiabilidade e à qualidade do fornecimento de energia elétrica. Seguindo este contexto, pode-se destacar o desenvolvimento de metodologias dedicadas à detecção, localização e predição de falhas referentes a todos os segmentos do sistema elétrico, abrangendo desde o setor da geração, passando pelo setor da transmissão e chegando até o setor da distribuição da energia elétrica. Em geral, a ocorrência de falhas dentro de cada um destes setores acarreta em efeitos indesejáveis, tais como a interrupção do fornecimento de energia elétrica e o desencadeamento de perturbações transitórias, as quais podem danificar equipamentos dos consumidores, impor prejuízos econômicos ao sistema produtivo, inutilizar equipamentos do sistema elétrico, afetar quesitos de qualidade de fornecimentos, etc.

Dentre os diversos equipamentos instalados junto ao sistema elétrico, os transformadores de transmissão destacam-se pela sua importância operacional e por constituírem um ponto crítico do sistema. Desta maneira, diante da inoperância de um transformador de transmissão, inúmeros clientes, sejam consumidores residenciais ou industriais, poderão ficar privados do fornecimento de energia elétrica, o que acarretaria, em grande parte dos casos, em prejuízos financeiros.

Diante dessa premissa, diversas pesquisas têm sido realizadas com o intuito de buscar por novas metodologias que sejam eficientes na detecção de falhas em transformadores de transmissão, sendo que um dos principais motivos é o alto custo associado tanto à aquisição de um novo transformador como à manutenção do mesmo. Por meio da análise da literatura correlata, pode-se verificar e destacar alguns métodos de ensaio de transformadores de transmissão visando à detecção de falhas, a saber: análise dos gases dissolvidos no óleo

isolante (GUARDADO, J. R.; NAREDO, J. L.; MORENO, P.; FUERTE, C. R., 2001); (HERMAN, H.; SHENTON, M.J.; STEVENS, G.C.; HEYWOOD, R.J., 2001) ensaios de relação de espiras (ZHU, S. P.; SHI, J., LIM, Y. S.; TAN, C. I.; CHEONG, Y. K., 1995) e ensaios de tensão induzida (KACHLER, A. J., 2000); (MOHSENI et al., 2008).

As abordagens de detecção de falhas em transformadores por meio da análise da concentração dos gases dissolvidos no óleo isolante do equipamento baseiam-se na constatação de que as falhas, tais como as descargas parciais, as descargas de alta energia, os efeitos corona, os sobreaquecimentos, dentre outros, interagem com o óleo isolante do transformador, e a partir desta interação, o óleo sofre alterações na sua composição química e nas suas propriedades físicas. Em geral, estas alterações são acompanhadas do desprendimento de gases que por apresentarem volumes ínfimos acabam por se dissolverem no óleo isolante. Através de ensaios cromatográficos realizados no óleo isolante, obtêm-se então os valores volumétricos dos principais gases que estão dissolvidos no óleo.

Além dos ensaios cromatográficos realizados com o óleo isolante, destacam-se também os ensaios físico-químicos feitos no mesmo. Através destes ensaios, diversas características físico-químicas do óleo isolante são levantadas. Dentre as propriedades físico-químicas de maior interesse (dentro do contexto de análise do óleo isolante) destacam-se o exame de cor, da densidade, da rigidez dielétrica, da tensão interfacial, do teor de água, do índice de neutralização e do fator de potência do óleo. Todos os ensaios físico-químicos mencionados podem ser realizados no próprio local de instalação do transformador, sendo que grande parte dos ensaios pode também ser realizado com o equipamento em funcionamento.

Ademais, podem ser destacados outros dois tipos de ensaios, os quais se fazem extremamente importantes no que diz respeito ao diagnóstico de transformadores de transmissão de energia elétrica. Estes ensaios são conhecidos como: ensaio de relação de espiras e ensaio de tensão induzida. Os ensaios de relação de espiras têm por objetivo diagnosticar o transformador em relação ao seu enrolamento (primário e/ou secundário), onde é verificada a relação entre as espiras do lado de alta e baixa tensão do transformador sob análise. Já os ensaios de tensão induzida, são empregados quando da necessidade de se realizar testes dielétricos (em campo) nos transformadores de potência. Entretanto, deve-se destacar que os ensaios de tensão induzida podem ser distintos dependendo da classe do transformador ao qual deseja aplicar o ensaio. As características detalhadas de cada um dos ensaios supracitados serão respectivamente comentadas nas Seções 2.2, 2.4 e 2.5.

Por fim, é importante comentar que os ensaios em transformadores de potência (com óleo isolante) devem respeitar as recomendações do (IEEE Std. C57.12.00-2006), as quais são apresentadas por meio da Tabela 2.1.

Tabela 2. 1 – Recomendações para ensaios em transformadores de potência com isolamento a óleo.

Ensaio	500 kV ou menor			501 kV ou maior		
	Rotina	Projeto	Outros	Rotina	Projeto	Outros
Medidas de resistência de todos os enrolamentos sobre a tensão nominal do <i>tap</i> e até os limites do <i>tap</i>		X		X		
Resistência de isolamento dos enrolamentos			X	X		X
Resistência de isolamento do núcleo			X	X		X
Teste de relação	X			X		
Polaridade e relação de fase	X			X		
Fator de potência			X	X		X
Controle de perdas			X			X
Excitação monofásica			X			X
Perdas sem carga e excitação de corrente a 100% e 110% da tensão nominal e também para a frequência nominal	X		X	X		X
Tensão sobre impedância e perda de carga em corrente nominal e frequência nominal		X	X	X		
Tensão sobre impedância de sequência zero						X
Aumento de temperatura		X	X		X	X
Testes dielétricos de baixa frequência	X			X		
Testes dielétricos ao impulso de descargas atmosféricas		X	X		X	X
Testes dielétricos do chaveamento do impulso, fase-terra						X
Teste dielétrico de descargas parciais			X	X		X
Som audível		X	X		X	X
Capacidade de curto-circuito		X				X
Análise de gases dissolvidos no óleo				X		X
Testes mecânicos		X			X	

Com relação aos ensaios que levam em consideração a resistência dos transformadores de potência, normalmente, são realizados para transformadores com potência

menor ou igual a 2500 kVA. Já os ensaios que consideram tanto a resistência quanto as perdas de carga podem ser omitidos para transformadores com potência igual ou menor que 500 kVA. Os ensaios que consideram o impulso de uma descarga atmosférica são dados como ensaio de rotina para transformadores de potência de classe II.

Deve-se destacar que para os ensaios relacionados na Tabela 2.1, faz-se necessário conectar e energizar o transformador de potência sob condições de tensão e frequência nominais de operação e sem carga. Os elementos do transformador que possam gerar ruídos devem encontrar-se operando de forma correta.

É importante ressaltar que dentre todos os ensaios citados na Tabela 2.1, sua grande maioria são destinados a transformadores de potência empregados no âmbito da transmissão de energia elétrica.

Após essa breve análise sobre os tipos de ensaios que são passíveis de serem realizados em transformadores de potência, observou-se que um sistema ideal para o diagnóstico de um transformador de transmissão precisaria empregar as vantagens de cada método, explorando-se suas eficiências ao mesmo tempo em que se busca sanar suas deficiências. Dentre todos os métodos de ensaio citados destacam-se os ensaios de tensão induzida, bem como a análise de relação de espiras, pois, do ponto de vista operacional, estas análises podem ser realizadas no local de instalação do transformador. Isto é diferente, por exemplo, da análise de gases que muitas vezes depende de uma análise cromatográfica e, portanto, faz-se necessário coletar uma amostra do óleo para que seja analisado em laboratório.

Devido aos diversos tipos de ensaios que podem ser realizados e também pela complexidade relacionada ao diagnóstico do transformador, esta se torna uma área potencial para a aplicação de sistemas inteligentes, os quais, neste caso, são empregados na forma de ferramenta de apoio à decisão.

2.2. ENSAIOS REALIZADOS EM ÓLEOS ISOLANTES

A função do óleo isolante em um transformador é propiciar isolamento elétrico e permitir a transferência de calor (refrigeração) entre suas partes componentes. Como isolante elétrico, o mesmo deve substituir o ar entre as partes ativas, preenchendo todos os

espaços vazios, e oferecer alta rigidez dielétrica e baixa condutividade elétrica. Atuando como meio de transferência térmica, o óleo isolante deve conduzir de maneira adequada a energia térmica das partes ativas do transformador ao meio de dissipação a fim de que a temperatura interna de funcionamento permaneça em níveis nominais de operação.

O óleo mineral isolante, comumente utilizado em transformadores, é obtido pela destilação fracionada do petróleo natural. Sua composição e características dependem da natureza do petróleo do qual foi extraído e do processo empregado na sua preparação. Dependendo do petróleo, o óleo isolante pode possuir base parafínica ou possuir base naftênica. Os óleos isolantes de base parafínica são chamados de óleo parafínico e os de base naftênica, de óleo naftênico.

Até o ano de 1920, o óleo parafínico possuía amplo uso, porém tinha aplicações restritas em regiões de inverno rigoroso, pois detinha um baixo ponto de fluidez. Desta forma, o óleo parafínico foi substituído pelo óleo naftênico, pois o ponto de fluidez deste a uma temperatura de -40°C permitia seu uso em regiões de inverno rigoroso. Entretanto, devido à escassez de petróleo naftênico (3% das reservas mundiais), o uso de óleo parafínico se torna cada vez maior. Para contornar as limitações advindas principalmente de seu ponto de fluidez, alguns aditivos foram desenvolvidos de maneira a permitir que este tipo de óleo possa ser empregado em regiões de invernos rigorosos (IMAMURA, M. M, 2000).

Atualmente, a PETROBRAS recomenda o óleo parafínico em aplicações nas quais os níveis de tensão dos transformadores sejam inferiores a 69 kV. O emprego de óleos isolantes de base parafínica também é crescente na Europa e nos Estados Unidos. Como exemplo da aplicabilidade dos óleos isolantes de base parafínica tem-se na Espanha o emprego destes óleos isolantes em equipamentos com níveis de tensão de até 500 kV.

O óleo isolante é constituído de uma mistura de hidrocarbonetos (saturados parafínicos e naftênicos, aromáticos) em sua maioria, e de não hidrocarbonetos, também chamados de heterocompostos (compostos de Nitrogênio ou compostos de Enxofre), os quais são empregados em menores proporções.

Torna-se muito difícil concluir se um óleo é do tipo naftênico ou parafínico por meio de uma simples análise. Assim, algumas relações de composição foram propostas por (MILASCH, M.,1984), com o intuito de tentar melhor identificar o tipo de óleo isolante, conforme pode ser visualizado por meio da Tabela 2.2.

Tabela 2. 2 – Identificação do óleo isolante pelo percentual de hidrocarbonetos.

Hidrocarbonetos	Tipo de Óleo Isolante	
	Naftênico	Parafínico
Compostos aromáticos (%)	11	8
Compostos naftênicos (%)	47	29
Compostos parafínicos (%)	42	63

É importante comentar que por meio da mistura de óleos minerais com características distintas, a mistura resultante terá valores característicos que representem a média de cada um dos componentes utilizados. No entanto, quando misturado óleo de más características físicas com óleos de boas características, tal mistura resultará em um óleo isolante de baixa qualidade. Estudos realizados indicam que os óleos parafínicos, criteriosamente misturados com outros tipos de óleos, decerados e adicionados de modificadores de escoamento, podem ser comparados com os tradicionais óleos naftênicos. Diversas pesquisas correlatas apontam que a melhor maneira de testar os óleos isolantes é colocá-los em serviço e acompanhar seu comportamento (MILASCH, M., 1984),

Em (IMAMURA, M. M, 2000), é realizado um estudo detalhado acerca das propriedades físico-químicas dos óleos isolantes de transformadores. Por meio deste estudo, são apresentados um breve resumo sobre as principais características físicas associadas aos óleos isolantes:

- ❖ **Cor:** os óleos isolantes, quando novos, apresentam coloração entre o incolor e o amarelo, sendo comum a denominação amarelo-palha. A luz solar direta e mesmo indireta age fortemente no sentido de alterar a coloração para amarelo intenso e, dependendo da intensidade e das condições climáticas, o óleo isolante pode se tornar laranja. A exposição às temperaturas elevadas resulta nos mesmos efeitos em um menor intervalo de tempo. Dependendo da severidade da exposição térmica, o óleo isolante pode ter sua coloração alterada para a tonalidade vermelha. À medida que o óleo isolante se deteriora, sua cor tende a escurecer. Uma alteração rápida da cor é uma indicação de deterioração, de contaminação ou de ambas.
- ❖ **Densidade:** a densidade relativa dos óleos isolantes encontra-se entre 0,850 e 0,900, estando mais próxima de um dos dois valores. Esta aproximação depende predominantemente do tipo de composição de hidrocarbonetos (parafínicos/naftênicos). A densidade não é significativa como fator

determinante da qualidade do óleo; no entanto, pode ser útil em determinadas situações para usos específicos.

- ❖ Viscosidade: é a resistência que um líquido oferece ao escoamento sob uma determinada temperatura. Normalmente, a viscosidade é medida pelo tempo que uma determinada quantidade de óleo leva para ser escoada através de um orifício com dimensão pré-determinada. O efeito "refrescador", ou seja, a quantidade de calor que o óleo é capaz de transferir (por hora e por área) do transformador para o meio ambiente, depende principalmente de sua viscosidade, que por sua vez é relativamente baixa.
- ❖ Ponto de Fulgor: é a menor temperatura em que, sob condições prescritas de ensaio, um óleo desprende vapores que, em mistura com o ar, são passíveis de inflamação na forma de lampejo (instantâneo e que se auto-extingue) quando da passagem de uma chama na superfície do óleo assim aquecido. Sua importância está relacionada ao perigo de incêndio.
- ❖ Ponto de Fluidez: é a menor temperatura em que o óleo ainda consegue fluir, quando ensaiado sob condições pré-estabelecidas. O ensaio ajuda na identificação do tipo de óleo, se de base parafínica ou de base naftênica, fornecendo-se certa orientação quanto às condições em que pode ser usado, ou seja, indica a menor temperatura ambiente permissível no local de instalação do transformador.
- ❖ Ponto de Anilina: é a temperatura em que ocorre a solubilização da mistura entre óleo e anilina. Está relacionada com a composição do óleo em termos da predominância de determinado tipo de hidrocarboneto (parafínico ou naftênico) presente no óleo. Os óleos parafínicos são mais pobres em naftênicos e aromáticos e exige uma maior temperatura de aquecimento da mistura para que ocorra a solubilização. O inverso ocorre com os naftênicos. Óleos de baixo ponto de anilina atuam negativamente de forma mais efetiva, provocando inchamento sobre vedadores a base de elastômeros ou borracha natural.
- ❖ Tensão Interfacial: na linha de contato das superfícies óleo-água, quando colocadas em contato estático, existe uma força de atração entre as moléculas dos dois líquidos que é a tensão interfacial comumente expressa em dyn/cm.

Num óleo novo esse valor é relativamente alto, ocorrendo à diminuição por efeito de contaminação e/ou degradação, sendo, portanto, um ótimo indicador da existência de contaminantes dissolvidos no óleo.

- ❖ Índice de Neutralização ou Índice de Acidez: é o número de miligramas de hidróxido de potássio (mgKOH) necessário para levar à neutralidade 1 grama de óleo. Os produtos decorrentes da degradação de um óleo são sempre ácidos e o índice de neutralização é uma medida indireta do nível dessa oxidação do produto, também chamada algumas vezes de deterioração. Os primeiros produtos da degradação são os peróxidos que possuem ação catalítica sobre os hidrocarbonetos do óleo, aumentando a velocidade de oxidação, até o estágio final, constituído por ácidos. Quando o índice de acidez ultrapassa o valor de 0,25 mgKOH, a acidez do óleo aumenta exponencialmente. A isolação celulósica é afetada por esse fenômeno, deteriorando-se aceleradamente.
- ❖ Rigidez Dielétrica: é a medida em Volts, de tensão alternada, na qual ocorre a descarga disruptiva na camada de óleo entre dois eletrodos, sob condições de ensaio. A rigidez dielétrica é pouco afetada pela quantidade de água dissolvida no óleo; por outro lado, ela é muito afetada pela água livre em suspensão. Comparativamente, existe maior favorecimento na suspensão de água livre em óleo oxidado do que num novo. Outro fator indesejado à rigidez dielétrica é a partícula sólida, finamente dividida, em suspensão (poeira, carvão, restos de fibras celulósicas, etc.). Cabe comentar que existe interação entre essas duas formas de contaminação no efeito rebaixador da rigidez dielétrica do óleo isolante.
- ❖ Fator de Potência: é o cosseno do ângulo de fase ou o seno do ângulo de perdas dielétricas do óleo, o qual aumenta com a degradação do óleo. O fator de potência também representa a medida da intensidade de corrente perdida no óleo que idealmente seria completamente inerte, não interferindo na transmissão de energia. O fator de potência aumenta com a temperatura e, portanto, as comparações de testes devem ser referenciadas a uma mesma temperatura (20°C). A quantidade de substâncias polares presentes, oriundas de contaminação e/ou oxidação, também provocam um aumento do fator de potência.

De modo a realizar um acompanhamento das condições operacionais do transformador que está sob análise, recomenda-se o emprego dos ensaios apresentados na Tabela 2.3, a qual determina os ensaios pertinentes de serem realizados no óleo isolante de transformadores em concordância com suas respectivas normas.

Tabela 2.3 – Normas a serem aplicadas nos ensaios do óleo isolante.

Ensaio do óleo isolante	Normas Aplicadas
Cor	ASTM D1524/1999
Densidade	NBR 7148/1992
Tensão Interfacial	NBR6234/1965
Teor de Água	NBR 5755/1984
Índice de Acidez Total	ASTM D974/1980
Rigidez Dielétrica	NBR 6869/1989
Fator de Potência a 20° C	ASTM D924/1999
Estabilidade à Oxidação	NBR 10504/1988
Viscosidade Cinemática	NBR 10441/1998
Ponto de Anilina	ABNT MB299/1990
Ponto de Fulgor e Combustão	ABNT MB50/1972
Grau de Polimerização em Papel Isolante	NBR 8148/2000
Análise Cromatográfica de Gases	NBR 7070/1981

Com exceção da análise cromatográfica dos gases dissolvidos no óleo, os demais ensaios podem ser feitos no próprio local de instalação do transformador. Além dos ensaios do óleo, feitos com transformador em operação, são também realizados, quando necessário, testes de isolamento, como por exemplo, fator de potência e resistência de isolamento, os quais exigem a desenergização da unidade.

2.3. DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM TRANSFORMADORES UTILIZANDO ANÁLISE DE GASES DISSOLVIDOS

O diagnóstico do estado e das condições de operação dos transformadores é de fundamental importância na operação confiável e econômica dos sistemas elétricos de potência. O envelhecimento e desgaste dos transformadores determinam o fim de sua vida útil, na medida em que a ocorrência de falhas ou os problemas crescentes de manutenção comprometem a confiabilidade ou disponibilidade funcional do equipamento. Assim, torna-se importante o conhecimento acerca dos mecanismos de deterioração e, também, possuir meios

que sejam tecnicamente significativos para que possam ser tomadas, de maneira correta, ações de manutenção preditiva, preventiva e/ou corretiva dos transformadores de potência.

O óleo deteriorado é aquele que apresenta produtos resultantes de sua oxidação, enquanto o óleo contaminado é aquele que apresenta água e outras substâncias distintas daquelas comumente encontradas no óleo (MILASCH, M., 1984).

O processo de degradação do óleo mineral pode ser apresentado em três fases distintas. A fase inicial caracteriza-se pela formação de peróxidos quimicamente instáveis, os quais liberam oxigênio e formam os compostos oxi-celulósicos com o papel isolante. A fase intermediária caracteriza-se pela formação de gases e, na fase final, a formação de borra, que geralmente consiste em uma substância resinosa resultante da polimerização a partir de ácidos e outros compostos químicos.

Os gases dissolvidos em óleos isolantes são provenientes de defeitos no interior do transformador. O relacionamento desses gases pode ser classificado em função do tipo de defeito, e a sua formação pode indicar a gravidade do defeito. Geralmente, a identificação e a quantificação dos tipos de gases são usadas para a realização de um planejamento da manutenção. Tendo em mãos a identificação dos gases presentes no óleo analisado, diversos métodos são propostos na literatura correlata com o intuito de se avaliar o envelhecimento natural da isolação, bem como a detecção e caracterização de falhas incipientes. A motivação e empenho dedicado a essa metodologia de detecção de falhas em transformadores justifica-se pela quantidade de falhas possíveis de serem identificadas, bem como pela qualidade e confiabilidade dos resultados alcançados (MILASCH, M., 1984).

2.3.1. MÉTODO DO GÁS CHAVE

O método de diagnóstico por meio do gás chave baseia-se no fato de que, quando há uma falha em evolução no transformador, a concentração dos gases associados à falha, ultrapassará os valores normais de degradação da isolação em relação aos estabelecidos em ensaios laboratoriais. O gás que caracteriza o tipo de falha é chamado então de gás chave. A norma (NBR 7274 – ABNT, 1982) traz os perfis típicos de composição de gases para serem utilizados no diagnóstico de falha em evolução no transformador. A Tabela 2.4 apresenta os perfis típicos de composição de gases relacionados à falha.

Tabela 2. 4 – Perfis típicos de composição frente à ocorrência de falhas.

Falha	Gás chave
Arco	Acetileno
Descargas parciais	Hidrogênio
Óleo superaquecido	Etileno
Celulose superaquecida	Monóxido de carbono
Eletrólise	Hidrogênio

Na sequência, são mostradas algumas das possíveis falhas verificadas em transformadores de potência, bem como seu respectivo gás chave e uma breve explanação de como o mesmo surge:

- ❖ Falha de formação de arco - o acetileno é o gás chave, portanto, grandes quantidades de hidrogênio e acetileno são produzidas com pequenas quantidades de metano e etileno. Caso a falha envolva a celulose, é possível observar a formação de dióxido e monóxido de carbono.
- ❖ Descargas parciais de baixa energia produzem hidrogênio e metano, com pequenas quantidades de etano e etileno. Quantidades comparáveis de monóxido e dióxido de carbono podem resultar de descargas em celulose. O gás chave referente às descargas parciais é o hidrogênio.
- ❖ Óleo superaquecido - produz etileno e metano, juntamente com quantidades menores de hidrogênio e etano. Traços de acetileno podem ser formados se a falha é severa ou se esta envolver contatos elétricos. O gás chave referente ao superaquecimento do óleo é o etileno.
- ❖ Celulose superaquecida - libera grandes quantidades de dióxido e monóxido de carbono e caso a falha envolva uma estrutura impregnada de óleo, formarão também metano e etileno. Neste caso o gás chave é o monóxido de carbono.
- ❖ Decomposição eletrolítica da água ou a decomposição da água associada com a ferrugem - resulta na formação de grandes quantidades de hidrogênio (gás chave), com pequenas quantidades dos outros gases combustíveis.

O método do gás chave, em geral, é empregado em situações em que se deseja obter um diagnóstico aproximado do estado do transformador, ou ainda, em situações em que já exista uma estimativa do tipo de falha que está ocorrendo.

2.3.2. MÉTODO DE DORNENBURG

O método de Dornenburg é uma forma empírica de identificação de falhas em transformadores e baseia-se no valor quantitativo dos gases dissolvidos no óleo mineral isolante. O método de Dornenburg foi desenvolvido através do estudo de inúmeros transformadores e é uma técnica recomendada na norma (IEEE C57.104/1991). Esse método de identificação de falhas em transformadores com base nos gases dissolvidos no óleo isolante, utiliza como referência para a classificação das falhas, as relações entre as concentrações de alguns dos gases obtidos através da cromatografia gasosa do óleo isolante.

A Tabela 2.5 sintetiza o método proposto por Dornenburg apresentando os valores das relações e as falhas relacionadas identificáveis por meio da análise destas relações.

Tabela 2. 5 – Identificação de falhas através do método de Dornenburg.

Tipo de falha	Razões			
	CH_4 / H_2	$\text{C}_2\text{H}_2 / \text{C}_2\text{H}_4$	$\text{C}_2\text{H}_6 / \text{C}_2\text{H}_2$	$\text{C}_2\text{H}_2 / \text{CH}_4$
Decomposição térmica	$> 1,0$	$< 0,75$	$> 0,4$	$< 0,3$
Descargas elétricas	$> 0,1$ $< 1,0$	$> 0,75$	$< 0,4$	$> 0,3$
Corona	$< 0,1$	Insignificante	$> 0,4$	$< 0,3$

2.3.3. MÉTODO DE ROGERS

Assim como o método de Dornenburg, o método de Rogers também é uma forma empírica para detecção de falhas nos transformadores de potência por meio da análise da concentração dos gases dissolvidos no óleo isolante. A Tabela 2.6 sumariza o método de Rogers para identificação de falhas.

Tabela 2. 6 – Identificação de falhas através do método de Rogers.

Falhas	Razões			
	CH_4/H_2	$\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$
Normal	$>0,1$ $<1,0$	$<1,0$	$<1,0$	$<0,5$
Descargas parciais do tipo corona	$\leq 0,1$	$<1,0$	$<1,0$	$<0,5$
Descargas parciais corona com <i>tracking</i>	$\leq 0,1$	$<1,0$	$<1,0$	$\geq 0,5$ $<3,0$ ou $\geq 3,0$
Descarga contínua	$>0,1$ $<1,0$	$<1,0$	$\geq 3,0$	$\geq 3,0$
Arco elétrico com grande dissipação de energia	$>0,1$ $<1,0$	$<1,0$	$\geq 1,0$ $<3,0$ ou $\geq 3,0$	$\geq 0,5$ $<3,0$ ou $\geq 3,0$
Arco elétrico com pequena dissipação de energia	$>0,1$ $<1,0$	$<1,0$	$<1,0$	$\geq 0,5$ $<3,0$
Superaquecimento para 150 °C	$\geq 1,0$ $<3,0$ ou $\geq 3,0$	$<1,0$	$<1,0$	$<0,5$
Superaquecimento 150 - 200 °C	$\geq 1,0$ $<3,0$ ou $\geq 3,0$	$\geq 1,0$	$<1,0$	$<0,5$
Superaquecimento 200 - 300 °C	$>0,1$ $<1,0$	$\geq 1,0$	$<1,0$	$<0,5$
Aquecimento dos condutores dos enrolamentos	$>0,1$ $<1,0$	$<1,0$	$\geq 1,0$ $<3,0$	$<0,5$
Circulação de corrente elétrica no núcleo ou no tanque	$\geq 1,0$ $<3,0$	$<1,0$	$\geq 3,0$	$<0,5$

Pode-se verificar nesta tabela, que o número de falhas possíveis de serem identificadas supera aquele fornecido pelo método de Dornenburg. No entanto, frente à avaliação de um transformador através das concentrações dos gases dissolvidos no seu óleo isolante é conveniente o emprego de ambas as metodologias a fim de se obter uma comparação de resultados. É importante comentar que o método de Rogers também é recomendado pela norma (IEEE C57.104/1991).

2.4. ENSAIOS DE RELAÇÃO DE ESPIRAS (TTR - TRANSFORMER TURN RATIO)

O ensaio TTR permite detectar a real relação de transformação do transformador, identificando se algum curto está ocorrendo entre as espiras por intermédio de falhas de isolamento. Esse procedimento é realizado com o transformador desenergizado e pode apontar a necessidade de se realizar a retirada de serviço do equipamento para uma inspeção interna. A Tabela 2.7 sintetiza os principais ajustes que devem ser realizados no núcleo do transformador após análises por meio do ensaio TTR.

Tabela 2. 7 – Análise dos resultados obtidos por meio de ensaio TTR.

Resultados dos testes (V_1/V_2)	Ajustes no transformador
Diferença menor que 0,2%	Nenhuma alteração
Diferença entre 0,2% e 0,5%	Diminuir 1,0
Maior que 0,5%	Pode indicar sérios problemas com o isolamento do núcleo, necessitando de maiores testes

O ensaio TTR pode ser realizado de duas formas: pelo método Bridge e pelo método de medição da relação de tensão entrada/saída dos enrolamentos.

Por meio desse método, aplica-se então uma tensão de fase em um dos enrolamentos, utilizando-se o equipamento conhecido como Bridge, medindo-se a relação da tensão induzida neste equipamento. O procedimento é repetido para todas as fases e posições de tap de maneira sequencial. Durante o processo de medição, apenas relações de transformações entre enrolamentos com o mesmo fluxo magnético podem ser medidas. Geralmente, utiliza-se uma tensão de 220 V/AC e frequência nominal da rede; entretanto, outros valores podem ser empregados.

A precisão do instrumento é de $\pm 0,1\%$. O esquema de medição pode ser conferido na Figura 2.1.

O valor teórico da relação de transformação do transformador a vazio é dado pela tensão no enrolamento de alta tensão sob a tensão no enrolamento de baixa tensão. Tal relação é ajustada no transformador padrão, até que se encontre o equilíbrio com 0% de erro. O valor de desvio é calculado segundo a Expressão (2.1).

Pelo método TTR, as tensões nos enrolamentos são medidas ao mesmo tempo para determinação da relação de transformação. Instrumentos para este fim, podem ser

utilizados, bem como medições de correntes podem ser usadas para determinação da relação de transformação. As medições devem apresentar resultados de TTR inferior a 0,5%.

Figura 2. 1 – Medição do tipo Bridge para realização do ensaio TTR.

$$Desvio = \frac{R_{Medida} - R_{esperada}}{R_{esperada}} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

Portanto, os ensaios de relação de espiras têm por objetivo a verificação da relação entre o número de espiras do lado de alta tensão do transformador e o número de espiras do lado de baixa tensão (IEEE Std. C57.12.90-1993). Além disso, o ensaio de relação de espiras entre enrolamentos deve ser executado com o transformador de potência sem carga e com tensão nominal de operação aplicada sobre o enrolamento que tiver o menor número de espiras. Assim, para os demais enrolamentos, deve ser aplicada uma tensão de 0,5% em relação à nominal. Ressalta-se que esta norma foi idealizada para transformadores trifásicos conectados em Y a quatro fios, isto é, considera-se o neutro. Portanto, para outros tipos de transformadores e/ou conexões, deve-se realizar as devidas transformações numéricas a fim de se adequar os valores (IEEE Std. C57.12.00-2006).

Seguindo o contexto supracitado, alguns trabalhos correlatos, divulgados na literatura técnico-científica, puderam ser verificados com o intuito de tornar claro ao leitor as potencialidades deste tipo de ensaio. Portanto, na sequência, estes trabalhos são explanados em maior nível de detalhes.

No trabalho de (ZHU et al., 1995) foi desenvolvido um protótipo para análise e teste in loco de transformadores de distribuição chamado TXWIN. O TXWIN permite que o usuário realize um teste do transformador sem carga, teste de perda de carga e teste de relação de transformação de forma automática via uma interface gráfica. Além disso, esta interface também contém outros testes de desempenho para transformadores, a saber: ensaio de medida de resistência, ensaio de alta tensão e ensaio de isolamento. Cabe comentar que o protótipo desenvolvido no trabalho referido, também tem a capacidade de analisar os resultados obtidos por meio dos ensaios, gerar relatórios personalizados (relacionados às análises) e armazenar os dados obtidos para cada um dos ensaios realizados em uma base de dados.

O objetivo do trabalho citado, era o desenvolvimento e implementação de uma interface gráfica que possibilite ao operador a execução dos testes supracitados, tanto para transformadores monofásicos quanto trifásicos. Além destas características, o trabalho também tinha como finalidade a criação de uma interface entre o microcomputador responsável pelas análises e os equipamentos de medição para que cada uma das medidas realizadas pudessem ser armazenada em uma base de dados.

É importante comentar que todos os ensaios realizados foram feitos com base nos padrões BS171 (IEC76), e/ou (ANSI C57). Entretanto, cabe ao usuário definir por meio da interface gráfica qual padrão será empregado para determinado ensaio.

De modo a realizar os ensaios, foram utilizadas placas de aquisição de dados com o padrão IEEE 488.2 em conjunto com uma interface GPIB. Assim, seis rotinas de ensaios foram executadas, conforme sequência abaixo:

- ❖ Medida de resistência do enrolamento esse ensaio consiste na medida de valores de resistência para determinar as perdas nos enrolamentos de alta e/ou baixa tensão.
- ❖ Medidas de perda de carga e tensão na impedância - o lado de baixa tensão é mantido com uma carga tal que apresente a tensão nominal do lado de baixa tensão, então, no lado de alta tensão é aplicada 50% da corrente nominal. As tensões e valores de potência ativa são então armazenados. Esses dados devem ser obtidos para 50% da corrente nominal e com temperatura ambiente. Assim, podem ser obtidos os valores das perdas de carga sob situação de o transformador estar

experimentando uma corrente máxima e com uma temperatura de referência de 75°C por meio de cálculos.

- ❖ Medidas de perda sem carga e medidas de corrente sem carga - A tensão nominal do lado de baixa tensão é aplicada para seu respectivo enrolamento e as medidas de corrente e potência ativa são armazenadas. Três valores são obtidos e armazenados para a corrente sem carga e para as perdas sem carga.
- ❖ Medidas de relação, polaridade e relação entre fases - estes ensaios são feitos para checar a relação de transformação do equipamento, inclusive para todas as posições de tap. Também serve para garantir que os enrolamentos de alta e baixa tensão tenham a mesma polaridade. Além disso, serve para garantir que a relação entre fases está correta.
- ❖ Ensaio de alta tensão - este ensaio é realizado para verificar se a isolamento entre os enrolamentos e o aterramento está correta. A tensão deve ser aplicada ao enrolamento durante 1 minuto. Assim, em condições normais, não deve haver uma descarga para o aterramento durante a realização do ensaio.
- ❖ Ensaio de isolamento - este ensaio visa medir as seguintes resistências de isolamento: entre o enrolamento de alta tensão e o aterramento – 5 kV; entre o enrolamento de alta tensão e o enrolamento de baixa tensão – 5 kV e entre o enrolamento de baixa tensão e o aterramento – 2,5 kV.

Na sequência é mostrada a Figura 2.2 que ilustra o diagrama de blocos do protótipo de ensaios.

Figura 2. 2 – Sistema protótipo para ensaios de transformadores de potência proposto por (ZHU et al., 1995)

No trabalho mencionado, foi realizado um estudo de caso, onde se empregou um transformador com as características apresentadas na Tabela 2.8.

Tabela 2. 8 – Características do transformador utilizado por (ZHU ET AL, 1995)

Características	Quantidades / Materiais
Tipo	N90
Material do Enrolamento Primário	Cobre
Material do Enrolamento Secundário	Cobre
Potência Nominal	1000 kVA
Tensão Nominal do Primário	22 kV
Tensão Nominal do Secundário	433 V
Regulação de Tensão	2,5%
Número de <i>Taps</i>	5

Para esse estudo de caso, foram realizados todos os ensaios supracitados. Os resultados relacionados ao ensaio de relação de espiras podem ser visualizados por meio da Tabela 2.9.

Depois de realizados todos os ensaios propostos por (ZHU et al.,1995) sobre o transformador tido como piloto, verificou-se que o software desenvolvido, bem como os ensaios, atende os padrões e especificações. É importante comentar que esse sistema foi

instalado na ABB Transformers Singapore como rotina de teste de novos transformadores de potência.

Tabela 2. 9 – Resultados obtidos por (ZHU et al.,1995) para o ensaio de relação de espiras.

Tap	AB/an	BC/bn	CA/cn
1	92.520	92.520	92.520
2	90.300	90.290	90.310
3	88.090	88.100	88.090
4	85.870	85.880	85.880
5	83.660	83.660	83.670

2.5. ENSAIOS DE TENSÃO INDUZIDA

O ensaio de tensão induzida tem por objetivo checar o isolamento entre as fases do transformador, entre as espiras do enrolamento e também entre os terminais de entrada do enrolamento e o terra. Durante o ensaio, normalmente, uma tensão é aplicada no lado de baixa enquanto que o lado de alta é deixado aberto e aterrado em um ponto comum.

Desde que a tensão empregada durante os ensaios seja superior à tensão de operação do lado de baixa do transformador, a frequência da tensão do ensaio necessita ser no mínimo duas vezes maior que a frequência de operação para que seja evitada a sobre-saturação do núcleo. A tensão de ensaio é escolhida de acordo com o enrolamento com maior tensão de operação. Também é possível realizar ensaios mantendo-se tensões próximas das operativas do enrolamento em questão.

A tensão de ensaio pode ser medida utilizando-se um divisor de tensão ou um Transformador de Potencial (TP) conectado ao lado de alta.

É importante destacar que o período de ensaio não pode ser inferior a 15 segundos, sendo o mesmo calculado de acordo com a Expressão (2.2).

$$Tempo = \frac{f_{operação}}{f_{teste}} \cdot 120 \quad (2.2)$$

O ensaio de tensão induzida pode ser considerado bem sucedido quando nenhum surto, colapso de tensão ou aumento de corrente for observado. Os ensaios são considerados de longa duração ou curta duração de acordo com a tensão de referência de 72,5 kV, conforme descrito na norma IEC 60076-3. Em transformadores com tensão de operação igual ou inferior a 72,5 kV, medições de descargas parciais não são imperativas. Entretanto, *Principais aspectos relacionados aos ensaios de transformadores de potência visando a detecção de falhas*

para transformadores com tensão superior a 72,5 kV, faz-se necessário a realização de medição de descargas parciais durante o ensaio de tensão induzida.

2.5.1. ENSAIOS DE CURTA DURAÇÃO PARA ENROLAMENTO UNIFORMEMENTE ISOLADO

Neste tipo de ensaio, uma tensão trifásica simétrica é aplicada ao transformador sob teste. Normalmente, a tensão do ensaio é duas vezes maior que a tensão do enrolamento. Por medidas de segurança, a posição do *tap* do transformador sob teste deve ser apropriada para os propósitos do ensaio. As medições são realizadas no lado de baixa, conforme apresentado na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Diagrama de conexão para ensaio de tensão induzida de curta duração para transformadores com enrolamento uniformemente isolado.

Na Figura 2.3 tem-se que: 1 - representa o gerador síncrono; 2 - representa o transformador de saída do gerador; 3 - representa um TC empregado como amperímetro; 4 - representa um TP empregado como volímetro; 5 - representa o transformador empregado como objeto de teste.

Na sequência, por meio da Figura 2.4, pode ser observado um diagrama temporal do ensaio de tensão induzida.

Figura 2. 4 – Diagrama temporal para ensaios de tensão induzida de curta duração.

Na Figura 2.4 deve-se destacar que $A = 5$ minutos, $B = 5$ minutos, C representa o período útil de ensaio, $D \geq 5$ minutos e $E = 5$ minutos. Além disso, cabe comentar que o valor de U_m é representado pela máxima tensão de operação.

2.5.2. ENSAIO DE CURTA DURAÇÃO PARA ENROLAMENTO NÃO-UNIFORMEMENTE ISOLADO

Nesse caso existem duas possibilidades de medições para transformadores trifásicos. Num primeiro cenário, realizam-se medições de descargas parciais entre fase e terra. Em um segundo modo, realizam-se medições de descargas parciais entre fases e também com o terra.

Em transformadores trifásicos, a tensão de ensaio é aplicada aos terminais de fase como uma única fase. O teste é repetido para cada fase. Assim, a tensão de ensaio prevista é aplicada uma vez a cada entrada no lado de alta. O diagrama de teste pode ser conferido na Figura 2.5.

Figura 2. 5 – Diagrama de conexão para ensaio de tensão induzida de curta duração para transformadores com enrolamento não-uniformemente isolado.

Na Figura 2.5 tem-se que 1 - representa o gerador síncrono; 2 - representa o transformador de saída do gerador; 3 - representa um TC empregado como amperímetro; 4 - representa um TP empregado como voltímetro; 5 - representa o transformador empregado como objeto de teste; 6 - representa um divisor de tensão capacitivo.

Para ensaios com tensão fase-fase, $U_2 = 1.3 \times U_m$ para os casos onde a descarga parcial estiver sendo medida concomitantemente. Em transformadores onde $U_m = 420 \text{ kV}$ ou 550 kV e a tensão de ensaio for igual a 460 kV ou 510 kV , o nível de tensão para as descargas parciais assume o valor de $U_2 = 1.3 \times U_m$ para ensaios com tensão fase-fase e $U_2 = 1.2 \times \frac{U_m}{\sqrt{3}}$ para ensaios com tensão fase-terra.

2.5.3. ENSAIO DE LONGA DURAÇÃO PARA ENROLAMENTO UNIFORME E GRADUAL

Neste tipo de ensaio, tem-se como principal ponto focal, o aterramento do enrolamento. Na sequência, é apresentado por meio da Figura 2.6, o diagrama temporal para ensaios de tensão induzida de longa duração.

Figura 2. 6 – Diagrama temporal para ensaios de tensão induzida de longa duração.

Na Figura 2.6 pode-se destacar que $A = 5$ minutos; $B = 5$ minutos; C é o período útil de ensaio, $D = 60$ minutos quando $U_m \geq 300$ kV e 30 minutos quando $U_m < 300$ kV e $E = 5$ minutos. O valor de U_m é representado pela máxima tensão de operação do transformador.

É importante destacar que em todos os períodos deste ensaio, deve-se realizar a medição de descarga parcial. As tensões devem ser $U_1 = 1,7 \times \frac{U_m}{\sqrt{3}}$ e $U_2 = 1,5 \times \frac{U_m}{\sqrt{3}}$, sendo que as medições de descargas parciais devem ser realizadas no lado de alta.

Para este tipo de ensaio, considera-se que o mesmo foi bem sucedido se nenhum surto ou colapso de tensão for verificado, bem como, aumento súbito da corrente, fumaça, sons incomuns ou formação de bolhas no óleo isolante.

Destaca-se que o ensaio de tensão induzida, quando realizado concomitantemente com medição de descargas parciais, é um dos mais importantes ensaios realizados para determinar a integridade da isolação do transformador. Durante tal procedimento, enrolamentos, terminais e isolação são estressados simultaneamente a níveis considerados acima dos operativos.

Defeitos de projeto ou mesmo da manufatura, podem ser caracterizados por meio de descargas parciais durante o ensaio de tensão induzida que, normalmente, são monitoradas durante todo o período de ensaio em transformadores com terminais de 115 kV ou superior.

As tensões almejadas nos ensaios são produzidas nos enrolamentos por meio de indução magnética. Uma vez que as tensões de ensaio são significativamente superiores às operativas, o núcleo normalmente satura caso a tensão esteja na frequência nominal do transformador. Desta forma, para evitar a saturação do núcleo, a frequência de teste é aumentada para um valor normalmente na faixa de 100-400 Hz.

Assim, o ensaio é normalmente feito por meio do aumento da tensão no lado de baixa, com valores capazes de induzir 1,5 vezes a tensão de operação máxima no lado de alta. Se nenhuma descarga parcial é detectada, a tensão é elevada para o nível máximo (geralmente 1,73 p.u.) por um período de 7200 ciclos na frequência de teste. A tensão é então reduzida para o nível de 1,5 p.u. e mantida durante o período de uma hora. Este teste é descrito graficamente na Figura 2.7.

Figura 2. 7 – Diagrama temporal para ensaios de tensão induzida durante a detecção de descargas parciais.

Nos EUA as medições de descargas parciais são realizadas utilizando-se detectores fundamentados em RIV (*Radio Influence Voltage*), os quais detectam sinais gerados no espectro de rádio frequência (em μV) quando da ocorrência de descargas parciais. Durante

o período de 1h, as leituras de descarga parciais são realizadas a cada 5 minutos. Os critérios para um teste bem sucedido são os seguintes:

- ❖ A magnitude da descarga parcial não pode exceder 100 mV (500 pC);
- ❖ Depois que o nível da descarga estabilizar, qualquer aumento não pode ser superior a 30 mV (150 pC);
- ❖ Os níveis de descargas parciais durante o período de 1h não mostram uma tendência crescente;
- ❖ Não existe um aumento sustentado do nível de descarga parcial durante os últimos 20 minutos do ensaio.

O circuito de teste para medição de descargas parciais durante o ensaio de tensão induzida é mostrado na Figura 2.8.

Figura 2. 8 – Diagrama esquemático para medição de tensão induzida com descargas parciais.

A capacitância é conectada a uma unidade de impedância de acoplamento, que fornece sinais de descargas parciais para a unidade de detecção. Se houver nível significativo de descargas parciais durante o ensaio, é desejável identificar e localizar a fonte do distúrbio no interior do transformador.

Seguindo o contexto, os autores (MOHSENI et al., 2008) apresentam os procedimentos necessários para o projeto e construção de um circuito para ensaio de tensão induzida em transformadores de potência. Além do ensaio de tensão induzida, foram realizadas medidas de perdas e ensaios de tensão aplicada, os quais se basearam no (IEC 60076-3). Para que os ensaios fossem devidamente conduzidos, empregou-se um inversor de frequência trifásico com uma faixa de frequência entre 0 e 200 Hz. Entretanto, também foram usados uma unidade de compensação, um transformador de adaptação e um filtro passivo de alta tensão para os testes de tensão induzida. Cabe comentar que estes ensaios foram especificados e realizados para transformadores de potência a serem instalados em subestações de energia elétrica.

Com relação aos requisitos mínimos para a realização dos ensaios de tensão induzida, um fator que deve ser devidamente verificado é a demanda de potência ativa e reativa, pois, a mesma depende dos parâmetros do transformador a ser ensaiado e também da frequência, conforme pode ser visualizado por meio da Figura 2.9.

Figura 2. 9 – Sistema protótipo para ensaios de transformadores de potência proposto.

De acordo com o IEC 60076-3, a frequência de teste deve ser ajustada para pelo menos 100 Hz de forma a precaver a saturação do transformador. Os ensaios foram

realizados empregando uma frequência de 150 Hz. Na sequência (Figura 2.10), um diagrama elétrico é apresentado de forma a melhor representar os ensaios propostos.

Figura 2. 10 – Sistema protótipo para ensaios de transformadores de potência proposto por (MOHSENI et al, 2008)

Por meio da Figura 2.10, é possível notar que o inversor de frequência constitui no bloco de entrada do sistema de teste, podendo ter sua frequência ajustada entre 0 e 200 Hz. Na saída do inversor de frequência é alocado um autotransformador; na sequência, é alocado um transformador que tem a função de equalizar os níveis de tensão das três fases. Após estas etapas, um conjunto de capacitores, um transformador sem isolamento a óleo para altas correntes e indutâncias, sendo as últimas, junto com os capacitores, responsáveis por trabalhar como um filtro passa-baixas. Por fim, entre o filtro passa-baixas e o transformador a ser ensaiado são alocados dois transdutores que, neste caso, são transformadores de tensão e corrente.

Capítulo 3 ASPECTOS DE PRÉ-PROCESSAMENTO REALIZADOS NOS ENSAIOS DE DESCARGAS PARCIAIS

3.1. INTRODUÇÃO

As tarefas de identificação e localização de falhas internas em transformadores de potência são extremamente importantes, visto que o equipamento possui um alto custo agregado tanto para compra como para manutenção.

As análises de gases dissolvidos e a análise das descargas parciais por meio de sensores de emissão acústica, são também cruciais para a manutenção do equipamento, pois podem trazer muitas vantagens, tais como a redução do risco de falhas inesperadas, contribuindo-se então para prolongar a vida útil do transformador, diminuindo seus custos de manutenção e reduzindo também o seu período de manutenção (devido à localização precisa da falha). Além disso, com o processamento destes dados por meio de sistemas especialistas inteligentes, torna-se possível fornecer respostas que auxiliam no processo de tomada de decisão sobre o potencial do transformador analisado.

O aparato experimental responsável pelo monitoramento do equipamento pode variar de acordo com o tipo de defeito a ser analisado. Em termos gerais, este sistema de monitoramento pode ser mais bem compreendido por meio da Figura 3. 1.

As estruturas destacadas (interior dos blocos) são aquelas que apresentam os maiores desafios frente à configuração e à parametrização, sendo estas inteiramente dependentes do tipo de testes a serem realizados.

Já a Figura 3.2, ilustra a fixação de sensores de emissão acústica montados nas paredes externas do tanque experimental, o qual foi especialmente confeccionado para os propósitos deste projeto de pesquisa, cujos sinais são transmitidos através de um cabo para o sistema de aquisição. A Figura 3.3 ilustra o layout que direcionou o posicionamento dos sensores de emissão acústica junto ao tanque experimental, tendo-se aqui, o propósito de que os mesmos pudessem cobri-lo de maneira bem distribuída.

Figura 3. 1 – Diagrama de blocos do sistema de monitoramento de sinais acústicos.

Figura 3. 2 – Disposição dos sensores de emissão acústica fixados ao lado de fora do tanque experimental repleto com óleo isolante

Figura 3. 3 – Diagrama (layout) para indicação de posicionamento de sensores de emissão acústica.

Um total de 35 ensaios experimentais foram realizados, sendo que para cada um deles, obteve-se cerca de 80 amostras. Cada ensaio teve também o local da descarga parcial alterado. A Figura 3. 3 ilustra as posições que foram variadas ao longo das coordenadas X, Y e Z do croqui que representa o tanque experimental.

A duração de cada ensaio transcorreu sobre o intervalo de 2 a 4 minutos, sendo que as amostras foram adquiridas num intervalo de 2 a 3 segundos entre uma e outra. Como exemplo de um desses experimentos realizados, apresenta-se na Figura 3. 45 o posicionamento do dispositivo responsável pela geração da descarga parcial, cujas coordenadas foram em $X = 85$ cm, $Y = 5$ cm e $Z = 86$ cm. Na Figura 3. 56 e Figura 3. 67 se ilustram os sinais de emissão acústica adquiridos em cada um dos sensores.

Figura 3. 4 – Variação de posições das descargas frente às posições X (a), Y (b) e Z (c).

Figura 3. 5 – Layout de experimento realizado no tanque experimental.

Figura 3. 6 – Sinais de emissão acústica aqisitados pelos sensores S1, S2, S3 e S4.

Figura 3.7 – Sinais de emissão acústica aqisitados pelos sensores S5, S6, S7 e S8.

3.2. CÁLCULOS REALIZADOS VISANDO O PRÉ-PROCESSAMENTO DOS SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA ADQUIRIDOS NA ETAPA EXPERIMENTAL

Com o intuito de pré-processar os sinais provenientes dos ensaios experimentais previamente realizados, efetuou-se os cálculos necessários para que os dados pudessem ser posteriormente submetidos às redes neurais artificiais. Seguindo este contexto, todos os cálculos são explanados tendo como base a Figura 3. 8 que representa um sinal de emissão acústica capturado após a ocorrência de uma descarga parcial num transformador de transmissão de energia elétrica.

Assim, analisando-se tal figura, é possível notar que uma das características consideradas para o pré-processamento do sinal é o valor da máxima amplitude adquirida pelo sensor de emissão acústica.

Além dessa amplitude máxima, outra variável que possui grande necessidade de ser definida é um limiar, pois, a partir deste limiar uma diversidade de características do sinal pode ser devidamente obtida, a saber: duração, tempo de subida e contagem de pontos acima do limiar.

Figura 3. 8 – Parâmetros extraídos dos sinais acústicos.

Ademais, calculou-se também, a energia do sinal e a medida da área do sinal que se encontra abaixo da envoltória do sinal retificado, sendo o primeiro cálculo destinado ao sinal como um todo, e o segundo responsável por contabilizar em seu cálculo somente a região de forte predominância da descarga parcial. É importante destacar que o cálculo da energia foi realizado seguindo a Expressão (3.1).

$$S = \sum_{i=1}^N p_i^2 \quad (3.1)$$

sendo que, N corresponde ao comprimento máximo do sinal e p representa o valor do ponto a ser contabilizado no somatório para a obtenção da energia.

Já a medida da área do sinal que se encontra abaixo da envoltória do sinal retificado corresponde também a um cálculo de energia que segue os mesmos moldes da expressão (3.1), porém, tem como pontos de interesse somente aqueles que se encontram sob a envoltória, pois, utiliza somente a informação dos dados que se encontram acima de zero.

O tempo de subida corresponde ao tempo que a descarga parcial gasta, a partir do primeiro ponto acima do limiar, até atingir o ponto onde a amplitude máxima foi medida.

A medida de duração representa o intervalo de tempo que é inicializado quando a primeira amostra cruza o limiar até o instante de tempo onde a última amostra encontra-se acima deste mesmo limiar. Portanto, de forma sumarizada, essa medida representa a duração da descarga parcial durante todo o tempo que o sinal de emissão acústica está acima do limiar previamente definido.

Por fim, realizou-se a contagem da quantidade de pontos que, após uma descarga parcial, puderam ser observados acima do limiar pré-definido.

Desta forma, é importante notar que grande parte das medidas são consideradas somente após a definição de um limiar, entretanto, em muitos casos, como os sinais de emissão acústica apresentam amplitudes muito baixas frente às descargas parciais, este limiar pode ser definido em zero.

Destaca-se que todas as características extraídas dos sinais de emissão acústica foram calculadas por serem aquelas que se apresentaram na literatura correlata como as mais relevantes e, portanto, devem ser consideradas neste projeto de pesquisa e desenvolvimento.

3.3. CARACTERÍSTICAS DOS SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA PROVENIENTES DO MÓDULO DE AQUISIÇÃO

O módulo de aquisição desenvolvido no permite o monitoramento simultâneo de 8 canais de sensores de emissão acústica, sendo o sinal no domínio do tempo adquirido em altíssima velocidade. Na Tabela 3. 1 encontra-se registrado, um pequeno exemplo de como o sinal de emissão acústica é armazenado, após o processo de digitalização.

A primeira coluna representa o tempo, e as demais à amplitude em Volts captada em cada um dos 8 canais monitorados. Cada arquivo possui cerca de “1100 pontos” x “8 colunas”. Dos 35 ensaios realizados, foram obtidos 2727 arquivos válidos de sinais de emissão acústica provenientes de descargas parciais.

Notadamente é expressiva a quantidade de dados experimentais que serão utilizados nos processos de aprendizado dos sistemas inteligentes.

Os dados no domínio do tempo ainda foram concatenados em uma grande base de dados de ensaios, com mais de “3 milhões de registros” x “21 colunas”, sendo que além da

identificação do ensaio e valores captados pelos oito sensores de emissão acústica, foram também inseridas as coordenadas do ponto de aplicação da DP no tanque experimental, além da distância euclidiana do ponto de aplicação da DP a cada um dos sensores. O objetivo da composição desta base mais ampla, consiste em facilitar os procedimentos de extração das características acústicas definidas na Seção 3.2 e que serão efetivamente empregadas no sistema de localização das descargas parciais.

Tabela 3.1 – Exemplo de sinal de emissão acústica adquirido pelo modo de aquisição.

Tempo (s)	Sensor 1 (V)	Sensor 2 (V)	Sensor 3 (V)	Sensor 4 (V)	Sensor 5 (V)	Sensor 6 (V)	Sensor 7 (V)	Sensor 8 (V)
0.0055	0.0153	0.0212	0.0204	0.0028	0.0222	0.0154	0.0246	0.0199
0.0056	0.0338	0.0148	0.0164	0.0307	0.0224	0.0133	0.0138	0.0187
0.0056	-0.0105	0.0099	0.0187	0.0221	0.0281	0.0219	0.0306	0.0030
0.0056	0.0107	0.0194	0.0220	0.0204	0.0135	0.0087	0.0347	0.0219
0.0057	0.0085	0.0287	0.0232	0.0537	0.0240	0.0240	0.0413	-0.0055
0.0057	0.0178	0.0221	0.0201	0.0193	0.0243	0.0348	0.0107	0.0297
0.0057	0.0142	0.0238	0.0175	0.0331	0.0075	0.0192	0.0255	0.0375
0.0058	0.0389	0.0259	0.0222	0.0255	0.0185	0.0236	0.0121	0.0349
0.0058	0.0174	0.0195	0.0184	-0.0024	0.0153	0.0150	-0.0021	0.0149
0.0058	0.0129	0.0163	0.0197	0.0059	0.0119	0.0174	0.0364	0.0324
0.0059	0.0188	0.0212	0.0216	0.0205	0.0145	0.0275	0.0056	0.0091
0.0059	0.0229	0.0308	0.0226	0.0226	0.0191	0.0274	0.0088	0.0248
0.0059	0.0317	0.0299	0.0196	0.0105	0.0180	0.0233	0.0244	0.0252
0.0060	0.0306	0.0141	0.0211	0.0240	0.0262	0.0228	0.0335	0.0264
0.0060	0.0106	0.0227	0.0181	0.0203	0.0195	0.0179	0.0139	0.0393
0.0060	-0.0042	0.0123	0.0145	0.0090	0.0206	0.0152	0.0176	0.0084
0.0060	0.0315	0.0187	0.0166	0.0336	0.0159	0.0236	0.0172	0.0301
0.0061	0.0294	0.0302	0.0187	-0.0032	0.0220	0.0178	0.0051	-0.0081

Para que todas as distâncias euclidianas fossem referenciadas na mesma base foi realizado uma transformação de coordenadas no sistema.

3.4. TRATAMENTO REALIZADO NOS SINAIS NO DOMÍNIO DO TEMPO

Utilizar diretamente os sinais do domínio do tempo, além de extremamente custoso computacionalmente, pode também não apresentar as características necessárias para o correto entendimento do fenômeno analisado.

Conforme já bastante delineado em literatura correlata, seis são as características mais interessantes para a tratativa de localização de sinais de descargas parciais, a saber: Amplitude Máxima, Duração, Contagem de Pontos, Tempo de Subida, Energia e Área da Envoltória. Assim, a base de dados completa com mais de 3 milhões de registros foi processado com o objetivo de se extrair das informações no domínio do tempo tais características pertinentes ao processo de localização das DP. Na Tabela 3. 2, é possível se contemplar um exemplo de resultado deste pré-processamento.

Tabela 3. 2 – Exemplo de dados pré-processados.

Amplitude Máxima	Duração	Contagem de Pontos	Tempo de Subida	Energia	Área do Envelope
0.94961	0.96987	0.96614	0.96160	0.91906	0.95007
0.92391	1.01384	0.96320	0.96170	0.91038	0.95060
0.91300	1.02681	0.96133	0.96171	0.90882	0.95087
0.93175	0.99916	0.96565	0.96168	0.91380	0.95038
0.91245	1.02195	0.96205	0.96172	0.90877	0.95076
0.91121	1.02095	0.96335	0.96172	0.90702	0.95074
0.91564	1.00579	0.96532	0.96170	0.91119	0.95060
0.93542	0.99358	0.96442	0.96166	0.91518	0.95038
0.91159	1.00832	0.96474	0.96172	0.91242	0.95061
0.92062	1.02165	0.96223	0.96172	0.90815	0.95067
0.94432	0.97002	0.96672	0.96163	0.91833	0.95006
0.94833	0.97302	0.96608	0.96161	0.91946	0.95015
0.91027	1.02329	0.96259	0.96171	0.90885	0.95096
0.93309	1.00244	0.96401	0.96169	0.91259	0.95040
0.89845	1.02865	0.96287	0.96174	0.90452	0.95120
0.94190	0.98006	0.96607	0.96165	0.91742	0.95012
0.92840	1.00237	0.96412	0.96168	0.91355	0.95047
0.91263	1.02117	0.96130	0.96171	0.90835	0.95094
0.93179	0.99951	0.96440	0.96169	0.91482	0.95049
0.92141	1.00422	0.96390	0.96171	0.91283	0.95050
0.95820	0.95542	0.96665	0.96157	0.92129	0.95002
0.91658	1.02430	0.95975	0.96172	0.90661	0.95107
0.92114	1.01675	0.96202	0.96171	0.90703	0.95086
0.92408	1.01421	0.96146	0.96171	0.90711	0.95065
0.92803	1.00163	0.96482	0.96168	0.91185	0.95057
0.92867	1.01115	0.96321	0.96169	0.91150	0.95064
0.92692	0.99973	0.96529	0.96168	0.91390	0.95055
0.94010	0.98725	0.96493	0.96166	0.91710	0.95022
0.97395	0.92253	0.97344	0.96139	0.93392	0.94979
0.97063	0.93289	0.96712	0.96145	0.92220	0.94992

Após esse processo, um total de “21816 registros” x “6 colunas” válidas são obtidas. Tal base de dados encontra-se então preparada para os processos de aprendizado das Redes Neurais Artificiais.

Capítulo 4 ASPECTOS DE TREINAMENTO DAS REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

4.1. INTRODUÇÃO

Existem várias ferramentas que podem ser empregadas em processos de estimação. Na estimação da distância espacial das Descargas Parciais em relação aos sensores, escolheram-se as Redes Neurais Artificiais (RNA).

A complexidade de relacionamento envolvendo as variáveis de entrada, bem como a grande massa de dados, foram os motivadores para tal escolha.

O aprendizado das RNA é realizado pelo processo de treinamento. Trata-se de um procedimento off-line, que tem por objetivo ajustar os pesos sinápticos que irão computar as contribuições de cada entrada para o processo de estimação. Uma vez treinadas as RNA, o processo de estimação passa a ser online, pois os cálculos são realizados de forma extremamente rápida (SILVA, I. N.; FLAUZINO, R. A; SPATTI, D. H, 2010).

A seleção de uma topologia de rede adequada normalmente é realizada por meio de inspeção, acompanhando cada passo do processo. Entretanto, tal processo é lento, e a cada nova topologia o usuário necessita fazer uma análise rigorosa. Assim, para o processo de estimação da distância, foi desenvolvido uma metodologia automatizada de treinamento e validação das RNAs.

4.2. METODOLOGIA AUTOMATIZADA DE TREINAMENTO

Encontram-se disponíveis para análises 21816 padrões, contendo 6 entradas e uma saída. Esses padrões costumam ser divididos em grupos, que são empregados para treinamento e validação. É preciso existir um equilíbrio na quantidade de padrões usados para cada fim, pois um número excessivo pode provocar lentidão no processo, ao passo que um número pequeno pode não resultar em uma rede generalista.

Desta forma, as seguintes configurações de agrupamentos foram testadas:

- ❖ Configuração 1: 60% para treinamento e 40% para validação.
- ❖ Configuração 2: 70% para treinamento e 30% para validação.
- ❖ Configuração 3: 80% para treinamento e 20% para validação.
- ❖ Configuração 4: diferentes combinações entre as Configurações 1, 2 e 3, escolhidas aleatoriamente e automaticamente.

A melhor configuração foi obtida com 17453 padrões para treinamento e 4363 padrões para validação. Cada treinamento representa uma solução que pode não ser aquela otimizada. Desta forma, é preciso realizar inúmeros treinamentos a fim de se encontrar a rede que melhor se enquadre nos propósitos. Neste sentido, foram avaliadas desde redes com apenas 1 neurônio na camada de saída, até redes com 2 camadas neurais intermediárias. Tal procedimento fora realizado automaticamente.

Assim, iniciam-se os ciclos de avaliação e incremento das camadas para cada novo treinamento, conforme o seguinte algoritmo:

- ❖ Inicializa-se a camada com 1 neurônio.
 - ❖ Se após 5 treinamentos o erro não diminuir, incrementa-se a quantidade de neurônios.
 - ❖ Cada rede com bons resultados é treinada 10 vezes. Depois, incrementa-se o número de neurônios.
 - ❖ Se após 20 treinamentos consecutivos não for observada melhora significativa de resultados em relação a todas as RNA já treinadas, reinicia-se então o ciclo, criando-se aqui, mais uma camada neural.
 - ❖ Retorna ao passo 1.
 - ❖ As melhores redes são escolhidas de acordo com o erro quadrático médio, desvio padrão do erro e o histograma do erro absoluto. Assim, tem-se 3 opções de RNA a serem avaliadas ao fim do processo.
-

4.3. ESTIMAÇÃO DAS DISTÂNCIAS PARCIAIS

De forma geral, as topologias de redes testadas apresentam característica semelhante a representada pela Figura 4. 1.

Figura 4. 1 – Representação das topologias avaliadas para redes com uma camada neural escondida.

É possível então salientar que as redes avaliadas terão uma topologia de 6 entradas, $1..M$ neurônios na camada neural escondida e uma saída d , que representa a distância (elevada ao quadrado) a ser estimada. Trata-se da distância de cada sensor ao ponto de aplicação da DP elevado ao quadrado.

Partindo-se das distâncias estimadas entre o ponto de ocorrência da descarga parcial e cada um dos sensores de emissão acústica é necessária a determinação da coordenada espacial desse ponto.

A estimativa das coordenadas espaciais a partir das distâncias constitui um problema não-linear, dada a natureza do cálculo da distância, e com incertezas decorrentes da estimativa da distância. Essas incertezas possuem origens distintas e dessas pode-se pontuar algumas das principais:

1. Os sensores de emissão acústica são, mesmo que minimamente, distintos entre si. Além disso, não há como garantir que a interface entre o sensor e a superfície onde ele se fixa é idêntica em todas as situações. Essa não garantia se deve às características metalúrgicas e de revestimento da superfície aonde os sensores se fixam.

2. O meio por onde as ondas elásticas se propagam não é uniforme e a modelagem do mesmo não é uma solução prática. Em transformadores, por exemplo, variações na temperatura do óleo faz com que as características do meio se alterem.

Em função da natureza do problema e das características listadas acima faz se necessário a escolha de uma abordagem que seja ao mesmo tempo eficiente, para uma rápido processamento computacional, e possível de contornar as particularidades desse problema.

Nesse sentido, a metodologia base para desenvolver o algoritmo de estimação das coordenadas espaciais da descarga parcial é fundamentada no algoritmo de Levenberg-Maquardt. O algoritmo de Levenberg-Maquardt constitui, basicamente, em uma interpolação entre o método de Gauss-Newton e o método de descida pelo gradiente sendo mais robusto que o primeiro e com uma convergência mais rápido do que o segundo. Em termos práticos, uma das características mais interessantes aos propósitos desse projeto é a rápida convergência do algoritmo.

Para o desenvolvimento da metodologia proposta, em primeiro lugar é necessário definir a função custo. Nesse caso, a função custo será definida da seguinte forma:

$$\xi = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^n (d_i^2 - \hat{d}_i^2)^2 \quad (4.1)$$

Sendo que d_i é a distância estimada pela rede neural artificial entre o ponto de ocorrência da descarga parcial e o i -ésimo sensor de emissão acústica, $\hat{d}_i$ é a distância calculada considerando-se a estimativa das coordenadas espaciais da descarga parcial e as coordenadas do i -ésimo sensor de emissão acústica, ou seja:

$$\hat{d}_i^2 = (x_i - \hat{x})^2 + (y_i - \hat{y})^2 + (z_i - \hat{z})^2 \quad (4.2)$$

Sendo que $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ são as coordenadas espaciais estimadas da descarga parcial. Em termos iterativos, a atualização do vetor de coordenadas espaciais será feita da seguinte maneira:

$$\mathbf{p}_{k+1} = \mathbf{p}_k + \boldsymbol{\delta}_k \quad (4.3)$$

Sendo que $\mathbf{p}_k = (\hat{x}_k \ \hat{y}_k \ \hat{z}_k)^T$ representa o vetor de coordenadas espaciais estimadas na k -ésima iteração do algoritmo e $\boldsymbol{\delta}_k$ é o vetor incremental o qual, por meio do algoritmo de Levenberg-Maquardt, é determinado por meio do seguinte sistema de equações lineares:

$$\left(\mathbf{J}_k^T \mathbf{J}_k + \lambda \text{diag}(\mathbf{J}_k^T \mathbf{J}_k)\right) \delta_k = \mathbf{J}_k^T (\mathbf{d} - \hat{\mathbf{d}}_k) \quad (4.4)$$

Sendo que $\mathbf{J}_k$ é a matriz Jacobina e, para esse problema, é definida da seguinte forma:

$$\mathbf{J}_k = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} \frac{\partial (d_1^2 - \hat{d}_1^2)^2}{\partial \hat{x}_k} & \frac{\partial (d_1^2 - \hat{d}_1^2)^2}{\partial \hat{y}_k} & \frac{\partial (d_1^2 - \hat{d}_1^2)^2}{\partial \hat{z}_k} \\ \frac{\partial (d_2^2 - \hat{d}_2^2)^2}{\partial \hat{x}_k} & \frac{\partial (d_2^2 - \hat{d}_2^2)^2}{\partial \hat{y}_k} & \frac{\partial (d_2^2 - \hat{d}_2^2)^2}{\partial \hat{z}_k} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial (d_n^2 - \hat{d}_n^2)^2}{\partial \hat{x}_k} & \frac{\partial (d_n^2 - \hat{d}_n^2)^2}{\partial \hat{y}_k} & \frac{\partial (d_n^2 - \hat{d}_n^2)^2}{\partial \hat{z}_k} \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

Cada um dos elementos da matriz $\mathbf{J}_k$ pode ser calculado da seguinte forma:

$$\begin{cases} \frac{\partial (d_j^2 - \hat{d}_j^2)^2}{\partial \hat{x}_k} = 4(d_j^2 - \hat{d}_j^2)(x_j - \hat{x}_k) \\ \frac{\partial (d_j^2 - \hat{d}_j^2)^2}{\partial \hat{y}_k} = 4(d_j^2 - \hat{d}_j^2)(y_j - \hat{y}_k) \\ \frac{\partial (d_j^2 - \hat{d}_j^2)^2}{\partial \hat{z}_k} = 4(d_j^2 - \hat{d}_j^2)(z_j - \hat{z}_k) \end{cases} \quad (4.6)$$

Dessa forma, a matriz Jacobiana será:

$$\mathbf{J}_k = \begin{pmatrix} (d_1^2 - \hat{d}_1^2)(x_1 - \hat{x}_k) & (d_1^2 - \hat{d}_1^2)(y_1 - \hat{y}_k) & (d_1^2 - \hat{d}_1^2)(z_1 - \hat{z}_k) \\ (d_2^2 - \hat{d}_2^2)(x_2 - \hat{x}_k) & (d_2^2 - \hat{d}_2^2)(y_2 - \hat{y}_k) & (d_2^2 - \hat{d}_2^2)(z_3 - \hat{z}_k) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ (d_n^2 - \hat{d}_n^2)(x_n - \hat{x}_k) & (d_n^2 - \hat{d}_n^2)(y_n - \hat{y}_k) & (d_n^2 - \hat{d}_n^2)(z_n - \hat{z}_k) \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

$$\mathbf{J}_k = \begin{pmatrix} d_1^2 - \hat{d}_1^2 & & \\ & d_2^2 - \hat{d}_2^2 & \\ & & \ddots \\ & & & d_n^2 - \hat{d}_n^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 - \hat{x}_k & y_1 - \hat{y}_k & z_1 - \hat{z}_k \\ x_2 - \hat{x}_k & y_2 - \hat{y}_k & z_2 - \hat{z}_k \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n - \hat{x}_k & y_n - \hat{y}_k & z_n - \hat{z}_k \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

$$\mathbf{J}_k = \left(\text{diag}(\mathbf{d}^2) - \text{diag}(\hat{\mathbf{d}}_k^2)\right) (\mathbf{P} - \mathbf{1}_{n \times 1} \mathbf{p}_k^T) \quad (4.9)$$

Tal que:

$$\text{diag}(\mathbf{d}^2) = \text{diag}(\mathbf{d}) \text{diag}(\mathbf{d}) = \begin{pmatrix} d_1^2 & & \\ & d_2^2 & \\ & & \ddots \\ & & & d_n^2 \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

$$\text{diag}(\hat{\mathbf{d}}_k^2) = \text{diag}(\hat{\mathbf{d}}_k) \text{diag}(\hat{\mathbf{d}}_k) = \begin{pmatrix} \hat{d}_{1k}^2 & & \\ & \hat{d}_{2k}^2 & \\ & & \ddots \\ & & & \hat{d}_{nk}^2 \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & z_n \end{pmatrix} \quad (4.12)$$

$$\mathbf{d} = (d_1 \quad d_2 \quad \cdots \quad d_n)^T \quad (4.13)$$

$$\hat{\mathbf{d}}_k = (\hat{d}_{1k} \quad \hat{d}_{2k} \quad \cdots \quad \hat{d}_{nk})^T \quad (4.14)$$

$$\hat{d}_{jk} = \sqrt{(x_j - \hat{x}_k)^2 + (y_j - \hat{y}_k)^2 + (z_j - \hat{z}_k)^2} \quad (4.15)$$

Dessa forma, o laço iterativo para o processo de estimação das coordenadas espaciais do ponto de ocorrência da descarga parcial pode ser formulado da seguinte maneira:

1. Fazer a estimativa das distâncias entre os sensores de emissão acústica e o ponto de ocorrência das descargas parciais por meio do uso de redes neurais artificiais e representar na forma do vetor $\mathbf{d}$;
2. Representar as coordenadas espaciais dos sensores de emissão acústica na forma da matriz $\mathbf{P}$;
3. Iniciar o vetor de coordenadas espaciais $\mathbf{p}$;
4. Calcular o vetor de distâncias estimadas $\hat{\mathbf{d}}$ por meio de (4.14);
5. Calcular a matriz $\mathbf{J}$ conforme (4.9);
6. Resolver (4.4) de forma a obter δ ;
7. Atualizar o vetor de coordenadas espaciais segundo (4.3);
8. Se o erro atingir o mínimo parar; Caso contrário retornar ao Passo 4.

Ao término desse algoritmo pode-se identificar o sensor que apresentou o maior erro na estimativa da distância. A medida referente a esse sensor pode ser excluída do conjunto de medições e o processo de estimativa pode ser repetido sem essa medida. A justificativa para exclusão da medida referente ao sensor com maior erro se baseia nas constatações pontuadas inicialmente. Em outras palavras, supõe-se que o sensor com maior erro esteja mais comprometido pelos erros de medição e, portanto, sua ausência reduzirá o ruído total nas medições e estimativas feitas.

O processo de remoção da medida correspondente ao sensor de maior erro pode ser repetido até que o número mínimo de medidas ainda permaneça.

4.4. RESULTADOS COMPUTACIONAIS PARA UMA CAMADA NEURAL ESCONDIDA – CICLO 1

Foram realizados nesta etapa 39 processos de treinamento, sendo que os resultados encontram-se registrados nas figuras que se seguem. Para esse ciclo, o número de neurônios na camada escondida, M , inicia-se em 5, seguindo-se então a aplicação do algoritmo automatizado de incremento.

Figura 4. 2 – Resultado do treinamento nº 1 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 3 – Resultado do treinamento nº 2 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 4 – Resultado do treinamento nº 3 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 5 – Resultado do treinamento nº 4 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 6 – Resultado do treinamento nº 5 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 7 – Resultado do treinamento nº 6 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 8 – Resultado do treinamento nº 7 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 9 – Resultado do treinamento nº 8 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 10 – Resultado do treinamento n° 9 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 11 – Resultado do treinamento n° 10 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 12 – Resultado do treinamento nº 11 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 13– Resultado do treinamento nº 12 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 14 – Resultado do treinamento nº 13 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 15 – Resultado do treinamento nº 14 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 16 – Resultado do treinamento nº 15 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4.17 – Resultado do treinamento nº 16 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4.18 – Resultado do treinamento nº 17 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 19 – Resultado do treinamento nº 18 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 20 – Resultado do treinamento nº 19 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 21 – Resultado do treinamento nº 20 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 22 – Resultado do treinamento nº 21 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 23 – Resultado do treinamento nº 22 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 24 – Resultado do treinamento nº 23 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 25 – Resultado do treinamento nº 24 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 26 – Resultado do treinamento nº 25 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 27 – Resultado do treinamento nº 26 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 28 – Resultado do treinamento nº 27 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 29 – Resultado do treinamento nº 28 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 30 – Resultado do treinamento nº 29 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 31 – Resultado do treinamento nº 30 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 32 – Resultado do treinamento nº 31 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 33 – Resultado do treinamento nº 32 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 34 – Resultado do treinamento nº 33 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 35 – Resultado do treinamento nº 34 para uma camada neural escondida (ciclo 1)

1). **Figura 4. 36 – Resultado do treinamento nº 35 para uma camada neural escondida (ciclo 1).**

Figura 4. 37 – Resultado do treinamento nº 36 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 38 – Resultado do treinamento nº 37 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 39 – Resultado do treinamento nº 38 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

Figura 4. 40 – Resultado do treinamento nº 39 para uma camada neural escondida (ciclo 1).

É possível observar que de acordo com o Erro Quadrático Médio (EQM) que é um parâmetro de treinamento, a melhor rede neural foi obtida com o treinamento de número 27. Já de acordo com o Desvio padrão observado nas amostras de validação, o melhor treinamento foi o de número 34. No entanto, nenhuma destas duas redes obteve um histograma aceitável de validação, se comparada ao treinamento de número 12.

Assim, conclui-se que deste ciclo, a melhor rede foi aquela obtida pelo treinamento de número 12.

Figura 4. 41 – Performance geral do primeiro ciclo de treinamento para uma camada neural escondida .

4.5. RESULTADOS COMPUTACIONAIS PARA UMA CAMADA NEURAL ESCONDIDA – CICLO 2

Foram realizados nesta etapa, 39 processos de treinamento, sendo que os resultados encontram-se registrados nas figuras que seguem. Os procedimentos foram os mesmos para o ciclo 1, com a diferença de que neste ciclo os neurônios na camada escondida foram iniciados com $M = 8$.

Figura 4. 42 - Resultado do treinamento nº 1 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 43 – Resultado do treinamento nº 2 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 44 – Resultado do treinamento n° 3 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 45 – Resultado do treinamento n° 4 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 46 – Resultado do treinamento nº 5 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 47 – Resultado do treinamento nº 6 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 48 – Resultado do treinamento n° 7 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 49 – Resultado do treinamento n° 8 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 50 – Resultado do treinamento nº 9 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 51 – Resultado do treinamento nº 10 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 52 – Resultado do treinamento nº 11 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 53 – Resultado do treinamento nº 12 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 54 – Resultado do treinamento nº 13 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 55 – Resultado do treinamento nº 14 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 56 – Resultado do treinamento nº 15 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 57 – Resultado do treinamento nº 16 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 58 – Resultado do treinamento nº 17 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 59 – Resultado do treinamento nº 18 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 60 – Resultado do treinamento nº 19 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 61 – Resultado do treinamento nº 20 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 62 – Resultado do treinamento nº 21 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 63 – Resultado do treinamento nº 22 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 64 – Resultado do treinamento nº 23 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 65 – Resultado do treinamento nº 24 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 66 – Resultado do treinamento nº 25 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 67 – Resultado do treinamento nº 26 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 68 – Resultado do treinamento n° 27 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 69 – Resultado do treinamento n° 28 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 70 – Resultado do treinamento nº 29 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 71 – Resultado do treinamento nº 30 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 72 – Resultado do treinamento nº 31 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 73 – Resultado do treinamento nº 32 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 74 – Resultado do treinamento nº 33 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 75 – Resultado do treinamento nº 34 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 76 – Resultado do treinamento nº 35 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 77 – Resultado do treinamento nº 36 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 78 – Resultado do treinamento nº 37 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 79 – Resultado do treinamento nº 38 para uma camada neural escondida (ciclo 2).

Figura 4. 80 – Resultado do treinamento nº 39 para uma camada neural escondida (ciclo 2)

O resultado geral deste ciclo de treinamento pode ser conferido por meio da Figura 4.81.

É possível observar que pelo critério do Erro Quadrático Médio, ou EQM, a melhor rede foi obtida pelo treinamento de número 26, sendo sua topologia 6-10-1. Cabe salientar que o EQM é um parâmetro de performance de treinamento. Já pelo critério do Desvio padrão, a melhor rede foi obtida pelo treinamento de número 37. Observando-se os resultados de estimação para estes dois casos, conclui-se que a melhor rede foi aquela obtida com o treinamento de número 26, pois foi a que apresentou o melhor histograma de validação, com quase metade das amostras com erro inferior a 5 cm de estimação.

Figura 4. 81 – Performance geral de treinamento para redes com uma camada neural escondida (ciclo 2).

4.6. RESULTADOS COMPUTACIONAIS PARA 2 CAMADAS NEURAIAS ESCONDIDAS – CICLO 1

De forma geral, as topologias de redes testadas apresentam característica semelhante à representada pela Figura 4.82.

Figura 4. 82 – Representação das topologias avaliadas para redes com duas camadas neurais escondidas.

É possível então salientar que as redes avaliadas terão uma topologia de 6 entradas, $1..M$ neurônios na primeira camada neural escondida, $1..N$ neurônios na segunda camada escondida e uma saída d . Neste primeiro ciclo inicia-se a primeira camada neural escondida com 10 neurônios e a segunda com 8 neurônios. Foram realizados 42 treinamentos, sendo os resultados apresentados nas figuras a seguir.

Figura 4. 83 – Resultado do treinamento nº 1 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 84 – Resultado do treinamento nº 2 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 85 – Resultado do treinamento nº 3 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 86 – Resultado do treinamento n° 4 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 87 – Resultado do treinamento n° 5 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 88 – Resultado do treinamento nº 6 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 89 – Resultado do treinamento nº 7 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 90 – Resultado do treinamento n° 8 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 91 – Resultado do treinamento n° 9 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 92 – Resultado do treinamento n° 10 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 93 – Resultado do treinamento n° 11 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1)

Figura 4. 94 – Resultado do treinamento nº 12 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 95 – Resultado do treinamento nº 13 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 96 – Resultado do treinamento nº 14 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 97 – Resultado do treinamento nº 15 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 98 – Resultado do treinamento nº 16 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 99 – Resultado do treinamento nº 17 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 100 – Resultado do treinamento nº 18 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 101 – Resultado do treinamento nº 19 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 102 – Resultado do treinamento n° 20 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 103 – Resultado do treinamento n° 21 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 104 – Resultado do treinamento nº 22 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 105 – Resultado do treinamento nº 23 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 106 – Resultado do treinamento n° 24 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 107 – Resultado do treinamento n° 25 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 108 – Resultado do treinamento nº 26 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 109 – Resultado do treinamento nº 27 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 110 – Resultado do treinamento n° 28 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 111 – Resultado do treinamento n° 29 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 112 – Resultado do treinamento nº 30 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 113 – Resultado do treinamento nº 31 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 114 – Resultado do treinamento n° 32 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 115 – Resultado do treinamento n° 33 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 116 – Resultado do treinamento nº 34 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 217 – Resultado do treinamento nº 35 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 118 – Resultado do treinamento n° 36 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 119 – Resultado do treinamento n° 37 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 120 – Resultado do treinamento nº 38 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 121 – Resultado do treinamento nº 39 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 122 – Resultado do treinamento n° 40 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 123 – Resultado do treinamento n° 41 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

Figura 4. 124 – Resultado do treinamento nº 42 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

É possível observar que pelo critério do Erro Quadrático Médio, ou EQM, a melhor rede foi obtida pelo treinamento de número 24, sendo sua topologia 6-12-8-1. Já pelo critério do Desvio padrão, a melhor rede foi obtida pelo treinamento de número 25. Entretanto, observando-se o histograma de estimação, a melhor rede foi obtida pelo treinamento de número 35 onde quase 4 mil padrões foram estimados com erro inferior a 25 cm.

Figura 4. 125 – Performance geral de treinamento para redes com duas camadas neurais escondidas (ciclo 1).

4.7. RESULTADOS COMPUTACIONAIS PARA 2 CAMADAS NEURAIIS ESCONDIDAS – CICLO 2

Neste ciclo foram realizados treinamentos semelhantes ao anterior, porém com M iniciando-se em 15 neurônios e N em 10 neurônios. Os resultados encontram-se destacados nas figuras a seguir.

Figura 4. 126 – Resultado do treinamento n° 1 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 127 – Resultado do treinamento n° 2 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 128 – Resultado do treinamento n° 3 para duas camadas neurais escondidas.

Figura 4. 129 - Resultado do treinamento n° 4 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 130 – Resultado do treinamento nº 5 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 131 – Resultado do treinamento nº 6 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 132 – Resultado do treinamento nº 7 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 133 – Resultado do treinamento nº 8 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 134 – Resultado do treinamento nº 9 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 135 – Resultado do treinamento nº 10 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 136 – Resultado do treinamento n° 11 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 137 – Resultado do treinamento n° 12 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 138 – Resultado do treinamento nº 13 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 139 – Resultado do treinamento nº 14 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 140 – Resultado do treinamento n° 15 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 141 – Resultado do treinamento n° 16 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 142 – Resultado do treinamento nº 17 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 143 – Resultado do treinamento nº 18 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 144 – Resultado do treinamento n° 19 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 145 – Resultado do treinamento n° 20 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 146 – Resultado do treinamento nº 21 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 147 – Resultado do treinamento nº 22 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 148 – Resultado do treinamento n° 23 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 149 – Resultado do treinamento n° 24 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 150 – Resultado do treinamento nº 25 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 151 – Resultado do treinamento nº 26 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 152 – Resultado do treinamento n° 27 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 153 – Resultado do treinamento n° 28 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 154 – Resultado do treinamento nº 29 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 155 – Resultado do treinamento nº 30 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 156 – Resultado do treinamento n° 31 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 157 – Resultado do treinamento n° 32 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 158 – Resultado do treinamento nº 33 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 159 – Resultado do treinamento nº 34 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 1630 – Resultado do treinamento n° 35 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 161 – Resultado do treinamento n° 36 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 1642 – Resultado do treinamento nº 37 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 163 – Resultado do treinamento nº 38 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 164 – Resultado do treinamento n° 39 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 165– Resultado do treinamento n° 40 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 166 – Resultado do treinamento nº 41 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

Figura 4. 167 – Resultado do treinamento nº 42 para duas camadas neurais escondidas (ciclo 2).

A performance geral deste ciclo de treinamentos pode ser acompanhada por meio da Figura 4.168, em que é possível observar que tanto pelo critério do EQM quanto do desvio padrão o treinamento escolhido fora o de número 38. Entretanto, observando-se os histogramas de validação de estimação da distância, o melhor treinamento foi aquele de número 30.

Figura 4. 168 – Performance geral para treinamentos de redes neurais de duas camadas escondidas (ciclo 2).

4.8. TESTE DE VALIDAÇÃO DE RESULTADO

Ao todo, foram treinadas 162 redes, destacando-se 4 topologias de uma camada neural escondida e 3 de duas camadas neurais escondidas. De uma forma geral, as redes com duas camadas neurais escondidas foram aquelas que apresentaram melhores resultados, sendo então, estas as escolhidas para o sistema de localização de descargas parciais.

4.9. REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS RESULTADOS

A partir dos cálculos das coordenadas espaciais das descargas parciais de cada sensor, foi desenvolvido um gráfico para representar o ponto de falha. Pelo fato de apresentar uma dispersão espacial e o resultado visual não ser intuitivo e de fácil localização do ponto exato da falha, optou-se por uma abordagem estatística e não determinística.

Para o desenvolvimento dessa abordagem foi utilizado a energia do sinal de cada sensor, partindo do princípio que a energia da onda elástica decai em função do inverso do quadrado da distância, conforme apresentado na Figura 4.169.

Figura 4. 169 – Representação da função da energia da onda elástica.

Dessa forma, a metodologia utilizada para o cálculo da dispersão da energia se baseou nas seguintes princípios:

1. A distância entre cada sensor e o ponto de ocorrência da descarga parcial é estimada pela rede neural;
2. Dadas as coordenadas dos sensores e as distâncias estimadas, calcula-se as coordenadas espaciais da descarga utilizando métodos matemáticos;
3. Com base nas distâncias e na energia mensurada em cada sensor estima-se a energia da descarga e o fator de dispersão;

Para definição da energia estimada da descarga parcial é empregada a seguinte equação:

$$\hat{\varepsilon} = \varepsilon_o - \frac{k}{d_i^2} \quad (4.16)$$

Sendo que, ε_o é a energia da descarga parcial (parâmetro a ser estimado), k é o fator de dispersão das descargas, e d_i^2 é a distancia entre o i -ésimo sensor e a descarga parcial inferida pela Rede Neural.

Estimando a energia de cada sensor e utilizando o método de minimização do erro quadrático de estimação é possível calcular o mapa de dispersão de energia, sendo indicada pela cor azul escuro o ponto de maior incidência das descargas parciais, resultando em uma alternativa eficiente para uma melhor localização da descarga parcial.

Figura 4. 170 – Representação gráfica do ponto de maior energia da descarga parcial .

Capítulo 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O desenvolvimento desta pesquisa contribuiu para a integração sistemática de três áreas (Métodos Computacionais, Critérios Técnicos, Ensaio de Descargas Parciais), que foram analisadas no desenvolvimento do projeto, conforme abaixo:

i) Métodos Computacionais: engloba o conjunto de métodos computacionais que são responsáveis pela simulação de sistemas Inteligentes utilizados para detectar descargas parciais em transformadores de potência.

ii) Critérios Técnicos: envolve os estudos relacionados as normas e procedimentos de critérios que permitem definir os tipos de ensaios mais adequados para os transformadores.

iii) Aspectos das Descargas Parciais: aborda os estudos que possibilitam investigar as principais características das descargas parciais, as quais incidem na partes internas periféricas dos Transformadores.

Nesta pesquisa, foi desenvolvida uma nova técnica para auxiliar na detecção de descargas parciais em transformadores de potência. O sistema inteligente é responsável pela tarefa de identificar o local de ocorrência da descarga, recebendo os dados fornecidos por um sistema eletrônico de aquisição de dados de emissão acústica, extraindo as características que por meio da aplicação de redes neurais artificiais permite estimar a distância da descarga parcial em relação a cada sensor, por conseguinte, aplicando-se técnicas de triangulação as distâncias estimadas, a coordenada espacial da descarga parcial é então inferida. Foi comprovado através dos testes das redes, utilizando os critérios do erro quadrático médio, desvio padrão do erro e histograma do erro absoluto que, as redes de duas camadas escondidas são as que apresentaram melhor desempenho, sendo que, em um processo de treinamento de quase quatro mil padrões foram estimados com erro inferior a 25 centímetros do local da descarga parcial.

Como trabalhos futuro, correlacionados ao tema desta dissertação pontua-seo estudo do comportamento desse sistema em transformadores do sistema elétrico de potência que apresentam algum tipo de falha interna.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFIA

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.NBR 7274: Interpretação e análise dos gases no óleo de transformadores em serviço. Rio de Janeiro:ABNT, 1982.
- DUVAL, M., “A Review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers”. *IEEE ElectricalInsulation Magazine*, v. 18, p. 8-17, 2002.
- GUARDADO, J. R.; NAREDO, J. L.; MORENO, P.; FUERTE, C. R., “A comparative study of neural network efficiency in power transformers diagnosis using dissolved gas analysis”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 16, n. 4, p. 643-647, 2001.
- HERMAN, H.; SHENTON, M.J.; STEVENS, G.C.; HEYWOOD, R.J., “A new approach to condition assessment and lifetime prediction of paper and oil used as transformer insulation”. *Proceedings of 7th International Conference on Solid Dielectrics*, Eindhoven, p. 473-476, 2001.
- IEEE Std. C57.104-1991, IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers and “IEEE Guide for Interpretation of Gasses Generated in Oil Immersed Transformers”, 1991.
- IEEE Std. C57.12.90-1993, IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers and “IEEE Guide for Short-Circuit Testing of Distribution and Power Transformers”, 1993.
- IEEE Std. C57.12.00-2006,IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, “IEEE Standard for Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers”, 2007.
- IMAMURA, M. M., “Uma Abordagem Neural Para Identificação de Gases Dissolvidos em Óleo Isolante de Transformadores em Função de Parâmetros Físico-Químicos”. *Dissertação de Mestrado em Engenharia Industrial*, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2000.
- KACHLER, A. J., “On-Site Diagnosis of Power and Special Transformers”. *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, p. 362-367, 2000.

- MILASCH, M., “Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante”. *Editora Edgar Blucher Ltda*, 1984.
 - SANTOS, Nerivaldo dos Reis, SILVA, Ivan Nunes, FLAUZINO, Rogério Andrade. “Sistemas Especialistas Para Projeto Otimizado de Sistemas de Aterramento e Proteção Eficiente de Transformadores Frente às Descargas Atmosféricas”, *Anais do XIX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (CD-ROM // Paper No. uu378 // 12 Páginas)*, 2010.
 - MOHSENI, H.; AKMAL, A. S.; JADIDIAN, J.; HASHEMI, E.; AGHEB, E.; NAIENY, A.; GHORBANDAEIPOUR, A.; NIAYESH, K., “Induced Voltage Test of Distribution Transformers Using State Frequency Inverters”. *IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition*, p. 1-5, 2008.
 - SANTOS, Nerivaldo dos Reis, SILVA, Ivan Nunes, FLAUZINO, Rogério Andrade, SPATTI, Danilo Hernane. “Optimized Selection Approach of Transformer Protection Devices against Atmospheric Discharges Using Expert System”, *Proceedings of the 2009 IEEE PES General Meeting (CD-ROM // Paper No. PESGM2009-001472 // 06 Páginas)*, 2009.
 - ZHU, S. P.; SHI, J.; LIM, Y. S.; TAN, C. I.; CHEONG, Y. K., “Transformer Testing and Analysis with a Window-based Graphic User Interface”. *International Conference on Energy Management and Power Delivery*, p. 410-415, 1995.
 - SILVA, Ivan Nunes, FLAUZINO, Rogério Andrade. “Redes Neurais Artificiais para engenharia e ciências aplicadas”, *São Paulo:Artliber*, 2010.
-