UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO–USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Gerson Bessa Gibelli

**Metodologia para o Diagnóstico e
Análise da Influência dos Afundamentos
e Interrupções de Tensão nos Motores
de Indução Trifásicos**

Gerson Bessa Gibelli

**Metodologia para o Diagnóstico e
Análise da Influência dos Afundamentos
e Interrupções de Tensão nos Motores
de Indução Trifásicos**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. Mário Oleskovicz

Coorientador: Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Jr.

São Carlos

2016

Trata-se da versão corrigida da tese. 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.

B445m Bessa Gibelli, Gerson
Metodologia para o Diagnóstico e Análise da
Influência dos Afundamentos e Interrupções de Tensão
nos Motores de Indução Trifásicos / Gerson Bessa
Gibelli; orientador Mário Oleskovicz; coorientador José
Carlos de Melo Vieira Jr. . São Carlos, 2016.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas
Elétricos de Potência -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.

1. Sistema elétrico industrial. 2. Qualidade da
energia elétrica. 3. Motor de indução trifásico. 4.
Transformada wavelet. 5. Função densidade de
probabilidade. 6. Correlação cruzada. 7. Rede neural
artificial. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **GERSON BESSA GIBELLI**.

Título da tese: "Metodologia para a definição de indicadores de qualidade da energia elétrica (QEE) para os motores de indução trifásicos (MITs)".

Data da defesa: 20/05/2016

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **Mario Oleskovicz (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Associado **Ivan Nunes da Silva**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Arnulfo Barroso de Vasconcellos**
(Universidade Federal de Mato Grosso/UFMT)

Prof. Dr. **Anésio de Leles Ferreira Filho**
(Universidade de Brasília/UnB)

Prof. Dr. **Ricardo Augusto Souza Fernandes**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Resultado:

APROVADO

APROVADO

APROVADO

Aprovado

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**

*À minha esposa Mirian e aos meus filhos Gabriel, Carolina e Guilherme pela
compreensão e amor dedicados durante a realização deste trabalho.*

Agradecimentos

Primeiramente, a DEUS pela minha vida e maravilhosa família.

A minha esposa Mirian e meus filhos Gabriel, Carolina e Guilherme pelo apoio, amor e muita compreensão.

Aos meus pais e irmãos por apoiarem e incentivarem a minha dedicação aos estudos.

Ao professor Dr. Mário Oleskovicz, pela orientação, por ter-me dado voto de confiança para que eu realizasse o doutorado, pela atenção dispensada, apoio e amizade em todos os momentos.

Ao professor Dr. José Carlos de Melo Vieira Jr., pela co-orientação deste doutorado, pela atenção dispensada, ideias e amizade em todos os momentos.

Aos amigos e colegas da Pós-Graduação, Athila, Carlos Beuter, Daniel, Douglas, Fabricio, Fernando, Jáder, Jeovane, Juliano, Lázaro, Luciano, Luis, Rodolfo, Rui, Thais, dentre outros, pela amizade e auxílio no que foi preciso.

Em especial, aos amigos André, Carlos Magno e Eduardo pelas ricas discussões, contribuições com suas ideias e auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos de São Carlos, Eduardo e Rafael pela companhia e amizade.

A *Tecumseh* do Brasil Ltda pelo incentivo e apoio por parte da realização deste trabalho.

A Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD, por proporcionar a realização deste trabalho após o exame de qualificação e através do meu afastamento integral no

último ano de doutorado.

Ao Engenheiro Fábio R. Ceresini da empresa *Tecumseh* do Brasil Ltda pelo apoio técnico no início deste trabalho.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) - Universidade de São Paulo (USP), que de algum modo colaboraram durante minha permanência na instituição.

Ao Laboratório de Sistema de Energia Elétrica - LSEE, pela alocação física e equipamentos disponibilizados para o desenvolvimento da pesquisa.

“A grande dádiva do ser humano é poder se reinventar sempre.”
(Gerson B. Gibelli)

Resumo

Gibelli, G.B. **Metodologia para o Diagnóstico e Análise da Influência dos Afundamentos e Interrupções de Tensão nos Motores de Indução Trifásicos.** 172 p. Tese de doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2016.

Nesta pesquisa, é proposta uma metodologia para detectar e classificar os distúrbios observados em um Sistema Elétrico Industrial (SEI), além de estimar de forma não intrusiva, o torque eletromagnético e a velocidade associada ao Motor de Indução Trifásico (MIT) em análise. A metodologia proposta está baseada na utilização da Transformada *Wavelet* (TW) para a detecção e a localização no tempo dos afundamentos e interrupções de tensão, e na aplicação da Função Densidade de Probabilidade (FDP) e Correlação Cruzada (CC) para a classificação dos eventos. Após o processo de classificação dos eventos, a metodologia como implementada proporciona a estimação do torque eletromagnético e a velocidade do MIT por meio das tensões e correntes trifásicas via Redes Neurais Artificiais (RNAs). As simulações computacionais necessárias sobre um sistema industrial real, assim como a modelagem do MIT, foram realizadas utilizando-se do *software DIGSILENT PowerFactory*. Cabe adiantar que a lógica responsável pela detecção e a localização no tempo detectou corretamente 93,4 % das situações avaliadas. Com relação a classificação dos distúrbios, o índice refletiu 100 % de acerto das situações avaliadas. As RNAs associadas à estimação do torque eletromagnético e à velocidade no eixo do MIT apresentaram um desvio padrão máximo de 1,68 p.u. e 0,02 p.u., respectivamente.

Palavras-chave: Sistema elétrico industrial. Qualidade da energia elétrica. Motor de indução trifásico. Transformada *Wavelet*. Função densidade de probabilidade. Correlação cruzada. Rede neural artificial.

Abstract

Gibelli, G.B. **Methodology for the Diagnosis and Analysis of Influence of Voltage Sags and Interruptions in Three-Phase Induction Motors**. 172 p. Ph.D. Thesis – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2016.

This study proposes a methodology to detect and classify the disturbances observed in an Industrial Electric System (IES), in addition to, non-intrusively, estimate the electromagnetic torque and speed associated with the Three-Phase Induction Motor (TPIM) under analysis. The proposed methodology is based on the use of the Wavelet Transform (WT) for the detection and location in time of voltage sags and interruptions, and on the application of the Probability Density Function (PDF) and Cross Correlation (CC) for the classification of events. After the process of events classification, the methodology, as implemented, provides the estimation of the electromagnetic torque and the TPIM speed through the three-phase voltages and currents via Artificial Neural Networks (ANN). The necessary computer simulations of a real industrial system, as well as the modeling of the TPIM, were performed by using the DIgSILENT PowerFactory software. The logic responsible for the detection and location in time correctly detected 93.4 % of the assessed situations. Regarding the classification of disturbances, the index reflected 100 % accuracy of the assessed situations. The ANN associated with the estimation of the electromagnetic torque and speed at the TPIM shaft showed a maximum standard deviation of 1.68 p.u. and 0.02 p.u., respectively.

Keywords: Industrial electrical system. Power quality. Three-phase induction motor. Wavelet transform. Probability density function. Cross correlation. Artificial neural network.

Lista de ilustrações

Figura 1	Porcentagem de utilização da energia elétrica no Brasil.	29
Figura 2	Custo das perdas nas indústrias químicas no período de 1 h.	30
Figura 3	Custo das perdas/consumo de energia nas indústrias de alimentos. . . .	31
Figura 4	Custo das perdas/consumo de energia nas indústrias mecânicas.	31
Figura 5	Formas básicas de algumas funções <i>wavelets</i>	44
Figura 6	Dilatação de uma <i>wavelet</i>	45
Figura 7	Translação de uma <i>wavelet</i>	46
Figura 8	A decomposição de um sinal pela TW.	48
Figura 9	Árvore de coeficientes quando da aplicação da Transformada <i>Wavelet Packet</i> (TWP) até o terceiro nível.	49
Figura 10	Exemplos de aplicações na engenharia que utilizam um modelo esto- cástico.	51
Figura 11	Conjunto de funções amostrais.	52
Figura 12	Função de autocorrelação de processos aleatórios com flutuações mais lentas e mais rápidas.	56
Figura 13	Cálculo da média de um sinal de tensão trifásico em regime.	57
Figura 14	Cálculo da média de um sinal de tensão trifásico de pós falta.	57
Figura 15	Cálculo da autocorrelação entre os sinais em regime e pós falta.	58
Figura 16	Probabilidade determinada, a partir da área sob $f(x)$	59
Figura 17	Histograma que aproxima uma função densidade de probabilidade. . .	59
Figura 18	Histograma que aproxima uma função densidade de probabilidade. . .	60
Figura 19	Apresentação do neurônio biológico (a) e artificial (b).	62
Figura 20	Função de ativação degrau.	63
Figura 21	Função de ativação sinal.	64
Figura 22	Função de ativação logística.	64
Figura 23	Função de ativação hiperbólica.	64
Figura 24	Rede <i>feedforward</i> de camada simples.	65

Figura 25	Rede <i>feedforward</i> de camadas múltiplas.	66
Figura 26	Rede recorrente.	67
Figura 27	Rede reticulada.	67
Figura 28	Arquitetura básica combinando multimedidores e IED aplicados à proteção.	70
Figura 29	Topologia para a alocação dos analisadores de QEE em um Sistema Elétrico de Potência (SEP) qualquer.	71
Figura 30	Diagrama de blocos básicos de um medidor de QEE.	71
Figura 31	Funcionalidades do IED para a proteção.	73
Figura 32	Diagrama de interligação de um IED para proteção do MIT.	74
Figura 33	Diagrama de blocos de um relé de proteção digital.	74
Figura 34	Diagrama representando o SEI modelado.	77
Figura 35	Fluxograma para a metodologia proposta.	82
Figura 36	Diagrama para o fluxo da informação na fase de aquisição dos dados.	83
Figura 37	Processo de digitalização de um sinal analógico.	84
Figura 38	Características da transferência ideal para um Conversor A/D de 3 bits.	85
Figura 39	Janela deslizante durante a aquisição dos dados.	86
Figura 40	Segmentação de um sinal de tensão trifásico.	87
Figura 41	Coeficientes do primeiro nível de detalhe para o sinal em análise.	88
Figura 42	Fluxograma do algoritmo para classificar o tipo de evento observado.	90
Figura 43	Gráfico do histograma para a relação da frequência versus a amplitude do sinal em análise.	91
Figura 44	Correlação cruzada entre os sinais das tensões medidas no barramento do MIT e nos demais barramentos do SEI.	93
Figura 45	Faixa de valores em p.u. considerada para associar as ocorrências às VTCDs.	95
Figura 46	Fluxograma Rede Neural Artificial.	97
Figura 47	Resposta da RNA para uma das situações de teste aplicadas para a estimação do torque eletromagnético.	100
Figura 48	Resposta da RNA para a fase de validação na estimação do torque eletromagnético.	101
Figura 49	Resposta da RNA na estimação da velocidade para uma específica situação de curto-circuito.	104
Figura 50	Resposta da RNA para a fase de validação na estimação da velocidade.	105
Figura 51	Topologia geral das redes neurais artificiais implementadas.	106
Figura 52	Sinais das tensões referentes a um curto-circuito trifásico franco no B2/BMT.	108

Figura 53	Sinais das tensões referentes a um curto-circuito trifásico franco registradas no B3/BMTM.	109
Figura 54	Detecção da falta trifásica para a fase <i>A</i> no barramento B3/BMTM. . .	109
Figura 55	Detecção da falta trifásica para a fase <i>B</i> no barramento B3/BMTM. . .	109
Figura 56	Detecção da falta trifásica para a fase <i>C</i> no barramento B3/BMTM. . .	110
Figura 57	Um ciclo do sinal de tensão pós falta referente a falta trifásica monitorada no barramento B3/BMTM no Motor 1.	110
Figura 58	Gráfico de histograma e da FDP para a fase <i>A</i>	111
Figura 59	Gráfico de histograma e da FDP para a fase <i>B</i>	111
Figura 60	Gráfico de histograma e da FDP para a fase <i>C</i>	112
Figura 61	Resposta da RNA para o torque eletromagnético frente a falta trifásica experimentada.	113
Figura 62	Resposta da RNA para a velocidade frente a falta trifásica experimentada.	114
Figura 63	Sinais das tensões referentes a um curto-circuito bifásico envolvendo as fases <i>C</i> e <i>A</i> no B2/BMT.	115
Figura 64	Sinais das tensões referentes a um curto-circuito bifásico envolvendo as fases <i>C</i> e <i>A</i> no B3/BMTM.	116
Figura 65	Detecção da falta bifásica para a fase <i>A</i> no barramento B3/BMTM. . .	116
Figura 66	Detecção da falta bifásica para a fase <i>B</i> no barramento B3/BMTM. . .	117
Figura 67	Detecção da falta bifásica para a fase <i>C</i> no barramento B3/BMTM. . .	117
Figura 68	Um ciclo do sinal de tensão pós falta referente à falta entre as fases <i>C</i> e <i>A</i> monitoradas no barramento B3/BMTM no Motor 1.	118
Figura 69	Gráfico de histograma e da FDP para a fase <i>A</i>	118
Figura 70	Gráfico de histograma e da FDP para a fase <i>B</i>	119
Figura 71	Gráfico de histograma e da FDP para a fase <i>C</i>	119
Figura 72	Resposta da RNA na validação do torque eletromagnético na falta entre fases <i>C</i> e <i>A</i>	120
Figura 73	Resposta da RNA para a velocidade frente a falta bifásica.	121
Figura 74	Sinais das tensões referentes a um curto-circuito monofásico envolvendo a fase <i>C</i> no B3/BMTM.	122
Figura 75	Detecção da falta monofásica para a fase <i>A</i> no barramento B3/BMTM.	123
Figura 76	Detecção da falta monofásica para a fase <i>B</i> no barramento B3/BMTM.	123
Figura 77	Detecção da falta monofásica para a fase <i>C</i> no barramento B3/BMTM.	123
Figura 78	Um ciclo do sinal de tensão pós falta referente à falta fase <i>C</i> - terra monitorada no barramento B3/BMTM no Motor 1.	124
Figura 79	Gráfico de Histograma e da FDP para a fase <i>A</i>	124
Figura 80	Gráfico de Histograma e da FDP para a fase <i>B</i>	125
Figura 81	Gráfico de Histograma e da FDP para a fase <i>C</i>	125

Figura 82	Resposta da RNA na validação do torque eletromagnético para uma falta monofásica.	127
Figura 83	Resposta da RNA para a velocidade frente a falta monofásica.	128
Figura 84	Sinais das tensões referentes a um curto-circuito bifásico com conexão a terra no B3/BMTM.	129
Figura 85	Detecção da falta bifásica a terra para a fase <i>A</i> no barramento B3/BMTM.	129
Figura 86	Detecção da falta bifásica a terra para a fase <i>B</i> no barramento B3/BMTM.	129
Figura 87	Detecção da falta bifásica a terra para a fase <i>C</i> no barramento B3/BMTM.	130
Figura 88	Um ciclo do sinal de tensão pós falta referente à falta bifásica a terra monitorada no barramento B3/BMTM no Motor 1.	130
Figura 89	Gráfico de histograma e da FDP para a fase <i>A</i>	131
Figura 90	Gráfico de histograma e da FDP para a fase <i>B</i>	131
Figura 91	Gráfico de histograma e da FDP para a fase <i>C</i>	131
Figura 92	Resposta da RNA na validação do torque eletromagnético para uma falta entre fases <i>A</i> e <i>B</i> a terra.	133
Figura 93	Resposta da RNA para a velocidade frente a falta bifásica a terra. . . .	134
Figura 94	Diagrama representando o SEI com os resultados após o cálculo do fluxo de potência.	149
Figura 95	Torque eletromagnético (a), e velocidade (b), em função do tempo no barramento BMTM durante a partida do Motor 1.	150
Figura 96	Tensão de alimentação no barramento BMTM durante a partida do Motor 1.	151
Figura 97	Variação das tensões do Motor 1 no barramento B3/BMTM.	151
Figura 98	Variação das correntes (a), e potências (b), do Motor 1, no barramento B3/BMTM.	152
Figura 99	Variação do torque eletromagnético (a), e da velocidade (b), do Motor 1, no barramento B3/BMTM.	153
Figura 100	Variação das tensões no Motor 1 para 1 segundo do afundamento manifestado no barramento B2/BMT.	154
Figura 101	Variação das correntes (a), e das potências (b), no Motor 1, para 1 segundo do afundamento manifestado no barramento B2/BMT. . . .	154
Figura 102	Variação do torque eletromagnético (a), e da velocidade (b), do Motor 1, no barramento BMT.	155

Lista de tabelas

Tabela 1	Faixas de frequência da aplicação da TWP ilustrada na Figura 9. . . .	50
Tabela 2	Características básicas dos analisadores comerciais.	72
Tabela 3	Características básicas dos relés comerciais.	75
Tabela 4	Parâmetros de entrada para modelar a subestação de energia.	78
Tabela 5	Parâmetros utilizados para modelar os transformadores de potência abaixadores T1 e T2.	78
Tabela 6	Valores dos níveis de curto-circuito trifásico no barramento B2/BMT com o disjuntor de interligação aberto para os transformadores T1 e T2.	79
Tabela 7	Valores dos níveis de curto-circuito trifásico no barramento B2/BMT com o disjuntor de interligação fechado para os transformadores T1 e T2.	79
Tabela 8	Parâmetros de entrada de cada carga para o módulo das cargas.	79
Tabela 9	Parâmetros de entrada do Motor 1.	80
Tabela 10	Parâmetros do torque eletromagnético do Motor 1.	81
Tabela 11	Limiares para a detecção.	88
Tabela 12	Valores absolutos calculados para as três fases.	91
Tabela 13	Menor valor obtido para cada fase analisada.	92
Tabela 14	Menor valor obtido para uma falta fase <i>A</i> - terra.	92
Tabela 15	Valores máximos obtidos pela correlação cruzada por fase.	94
Tabela 16	Valores máximos obtidos via a correlação cruzada para uma falta fase <i>A</i> - terra.	94
Tabela 17	Resposta do classificador para uma falta fase <i>A</i> - terra.	95
Tabela 18	Divisão dos tipos de faltas por classes.	98
Tabela 19	Parâmetros das RNAs utilizadas.	100
Tabela 20	Resultados obtidos para os testes da RNA para a estimação do torque eletromagnético.	100
Tabela 21	Divisão dos tipos de faltas por classes.	101

Tabela 22	Resultados obtidos para a fase de validação na estimação do torque eletromagnético.	102
Tabela 23	Parâmetros da RNA utilizada.	104
Tabela 24	Avaliação da estimação da velocidade para uma específica situação de curto-circuito.	104
Tabela 25	Resultados obtidos para uma específica situação de curto-circuito no processo de validação da estimação da velocidade.	105
Tabela 26	Valores da correlação cruzada para um curto-circuito trifásico franco. .	112
Tabela 27	Resposta do classificador para uma falta trifásica aplicada no barramento B2/BMT.	112
Tabela 28	Índices obtidos na validação do torque eletromagnético para a falta trifásica em análise.	114
Tabela 29	Índices obtidos na validação da velocidade para falta trifásica.	114
Tabela 30	Valores da correlação cruzada para uma falta envolvendo as fases <i>C</i> e <i>A</i> . .	118
Tabela 31	Resposta do classificador para uma falta envolvendo as fases <i>C</i> e <i>A</i> . .	120
Tabela 32	Índices obtidos na validação do torque eletromagnético para a falta entre fases <i>C</i> e <i>A</i> em análise.	121
Tabela 33	Índices obtidos na validação da velocidade para a falta bifásica.	121
Tabela 34	Valores da correlação cruzada para uma falta envolvendo a fase <i>C</i> - terra. .	126
Tabela 35	Resposta do classificador para uma falta envolvendo a fase <i>C</i> - terra. .	126
Tabela 36	Índices obtidos na validação do torque eletromagnético para uma falta fase <i>C</i> - terra.	127
Tabela 37	Índices obtidos na validação da velocidade para a falta monofásica. . .	127
Tabela 38	Valores da correlação cruzada para uma falta envolvendo as fases <i>A</i> e <i>B</i> a terra.	132
Tabela 39	Resposta do classificador para uma falta envolvendo as fases <i>A</i> e <i>B</i> a terra.	132
Tabela 40	Resultados obtidos para a validação do torque eletromagnético para uma falta entre fases <i>A</i> e <i>B</i> a terra.	133
Tabela 41	Resultados obtidos para a validação da velocidade para uma falta entre fases <i>A</i> e <i>B</i> a terra.	134
Tabela 42	Valores máximos da correlação cruzada do barramento BAT para falta trifásica.	157
Tabela 43	Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMT para falta trifásica.	157
Tabela 44	Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMTM para falta trifásica.	158

Tabela 45	Valores máximos da correlação cruzada do barramento BAT para falta AB.	158
Tabela 46	Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMT para falta AB.	158
Tabela 47	Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMTM para falta AB.	159
Tabela 48	Valores máximos da correlação cruzada do barramento BAT para falta BC.	159
Tabela 49	Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMT para falta BC.	159
Tabela 50	Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMTM para falta BC.	160
Tabela 51	Valores máximos da correlação cruzada do barramento BAT para falta CA.	160
Tabela 52	Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMT para falta CA.	160
Tabela 53	Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMTM para falta CA.	161
Tabela 54	Valores máximos da correlação cruzada do barramento BAT para falta AB-T.	161
Tabela 55	Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMT para falta AB-T.	161
Tabela 56	Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMTM para falta AB-T.	162
Tabela 57	Valores máximos da correlação cruzada do barramento BAT para falta BC-T.	162
Tabela 58	Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMT para falta BC-T.	162
Tabela 59	Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMTM para falta BC-T.	163
Tabela 60	Valores máximos da correlação cruzada do barramento BAT para falta CA-T.	163
Tabela 61	Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMT para falta CA-T.	163
Tabela 62	Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMTM para falta CA-T.	164
Tabela 63	Valores máximos da correlação cruzada do barramento BAT para falta A-T.	164

Tabela 64	Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMT para falta A-T.	164
Tabela 65	Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMTM para falta A-T.	165
Tabela 66	Valores máximos da correlação cruzada do barramento BAT para falta B-T.	165
Tabela 67	Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMT para falta B-T.	165
Tabela 68	Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMTM para falta B-T.	166
Tabela 69	Valores máximos da correlação cruzada do barramento BAT para falta C-T.	166
Tabela 70	Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMT para falta C-T.	166
Tabela 71	Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMTM para falta C-T.	167
Tabela 72	Índices de erro referentes à validação do torque eletromagnético.	167
Tabela 73	Índices de erro referentes à validação da velocidade.	168
Tabela 74	Índices de erro referentes ao treinamento do torque eletromagnético.	168
Tabela 75	Índices de erro referentes ao treinamento da velocidade.	169

Lista de siglas

AMR	Análise Multiresolução
CC	Correlação Cruzada
FDP	Função Densidade de Probabilidade
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>
LSB	<i>Least Significant Bit</i>
MAPE	<i>Mean Absolute Percentage Error</i>
MSE	<i>Mean Square Error</i>
MIT	Motor de Indução Trifásico
PE	Processo Estocástico
PDS	Processamento Digital de Sinais
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RTD	<i>Resistive Temperature Device</i>
RTDS	<i>Real Time Digital Simulator</i>
SDRAM	<i>Synchronous Dynamic Random Access Memory</i>
SEI	Sistema Elétrico Industrial
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SSS	<i>Strict Sense Stationary</i>
TF	Transformada de <i>Fourier</i>

TW Transformada *Wavelet*

TWC Transformada *Wavelet* Contínua

TWD Transformada *Wavelet* Discreta

TWP Transformada *Wavelet Packet*

VA Variável Aleatória

WSS *Wide Sense Stationary*

Sumário

1	Introdução	29
1.1	Contribuições da Pesquisa	33
1.2	Estrutura do Trabalho	34
2	Revisão Bibliográfica	35
2.1	Ferramentas Estocásticas	35
2.2	Analisadores de Qualidade da Energia e Relés de Proteção	36
2.3	Qualidade da Energia Elétrica	38
3	Referencial Teórico	43
3.1	Transformada <i>Wavelet</i>	43
3.1.1	Funções <i>Wavelets</i>	44
3.1.2	A Transformada <i>Wavelet</i> Contínua	45
3.1.3	A Transformada <i>Wavelet</i> Discreta	46
3.1.4	Implementação da Transformada <i>Wavelet</i> Discreta	48
3.1.5	A Transformada <i>Wavelet</i> Packet	49
3.2	Ferramenta Estocástica	49
3.2.1	Processo Estacionário	52
3.2.2	Média	54
3.2.3	Autocorrelação	54
3.2.4	Correlação Cruzada	60
3.3	Redes Neurais Artificiais	61
3.3.1	Função de ativação	63
3.3.2	Arquitetura da RNA	65
3.3.3	Processo de treinamento e aprendizado	66
3.4	Considerações Parciais	68

4	Metodologia Proposta	69
4.1	Monitoramento da QEE	69
4.1.1	Analizador de Qualidade da Energia Elétrica	70
4.1.2	<i>Intelligent Electronic Device</i>	72
4.2	Sistema Elétrico Industrial Utilizado	75
4.2.1	<i>Software DIgSILENT PowerFactory</i>	76
4.2.2	Sistema Elétrico Industrial	76
4.3	Estrutura da metodologia proposta	81
4.3.1	Módulo de Pré-processamento	82
4.3.2	Módulo de Detecção	86
4.3.3	Módulo de QEE	89
4.4	Considerações Parciais	106
5	Apresentação e Discussão dos Resultados	107
5.1	Análise das tensões trifásicas: falta trifásica no barramento B2/BMT - 11,95 kV	108
5.1.1	Detecção	108
5.1.2	Classificação	110
5.1.3	Estimação do torque eletromagnético e da velocidade no Motor 1 .	113
5.2	Análise das tensões trifásicas: falta bifásica no barramento B2/BMT - 11,95 kV	115
5.2.1	Detecção	115
5.2.2	Classificação	117
5.2.3	Estimação do torque eletromagnético e da velocidade no Motor 1 .	120
5.3	Análise das tensões trifásicas: falta monofásica (fase <i>C</i>) no barramento B3/BMTM - 4,16 kV	122
5.3.1	Detecção	122
5.3.2	Classificação	124
5.3.3	Estimação do torque eletromagnético e da velocidade no Motor 1 .	126
5.4	Análise das tensões trifásicas: falta bifásica com conexão a terra no bar- ramento B3/BMTM - 4,16 kV	128
5.4.1	Detecção	128
5.4.2	Classificação	130
5.4.3	Estimação do torque eletromagnético e da velocidade no Motor 1 .	133
5.5	Considerações Parciais	135
6	Conclusões	137
	Referências	141

Apêndices	147
APÊNDICE A Simulações Executadas	149
A.1 Partida do Motor 1	150
A.2 Situações de Faltas aplicadas sobre o SEI	151
APÊNDICE B Tabelas	157
APÊNDICE C Divulgação da pesquisa	171

Introdução

A disponibilidade e o uso adequado da energia elétrica pela sociedade refletem-se na melhoria do conforto nas habitações, qualidade de vida e avanço tecnológico (STEVENSON, 1978). A partir da década de 90, um novo modelo e estrutura do setor elétrico foram introduzidos no Brasil, onde grande parte das empresas distribuidoras foi privatizada levando à necessidade de um maior controle da Qualidade da Energia Elétrica (QEE) fornecida aos consumidores finais.

Cabe colocar que, principalmente nos últimos 15 anos, houve uma crescente preocupação dos especialistas e pesquisadores devido à grande quantidade de equipamentos e processos sensíveis que são afetados por problemas associados à falta de uma desejada QEE. Esta preocupação advém principalmente do crescimento de cargas não lineares provenientes de novos equipamentos instalados no Sistema Elétrico de Potência (SEP), que podem gerar e serem sensíveis a vários problemas, provocando grandes prejuízos aos consumidores finais da energia elétrica (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2005; KAGAN; ROBBA; SCHMIDT, 2009).

Dentre os consumidores finais (setor industrial, comercial, residencial, público, rural e outros), estudos apontam que o setor industrial é o responsável por 40 % do consumo da energia elétrica no Brasil, conforme apresentado na Figura 1 (EPE, 2014).

Figura 1: Porcentagem de utilização da energia elétrica no Brasil.

Fonte: (EPE, 2014).

Para o setor industrial em específico, o aumento da eficiência no uso da energia elétrica tem resultado no avanço e na integração dos processos automatizados (principalmente pelo uso de equipamentos controlados eletronicamente), os quais, por sua vez, podem ser sensíveis às variações de tensão e/ou provocar alterações na tensão fornecida em um determinado Ponto de Acoplamento Comum (PAC), podendo também influenciar no processo produtivo e provocar perdas econômicas consideráveis (SCHAEEL; SOURKOUNIS, 2013).

Vale apontar que as perdas econômicas podem ser em função da severidade dos distúrbios sobre um determinado ponto do sistema, vindo a provocar paradas não programadas dos processos produtivos. Sendo assim, desde a década de 80, são encontrados na literatura correlata estudos refletindo a preocupação dos impactos econômicos nos consumidores industriais devido aos problemas associados à falta da QEE (GHANDEHARI; JALILIAN, 2004).

Em Melo e Cavalcanti (2012), apresenta-se uma avaliação dos impactos dos custos da QEE em consumidores industriais dos estados do nordeste Brasileiro. Tais consumidores possuem suas atividades econômicas nos segmentos: químico, metalúrgico, têxtil, alimentício, mecânico, farmacêutico, material elétrico, calçado e vidro. Os cálculos foram realizados considerando os custos das perdas (US\$) para uma interrupção da energia elétrica nos consumidores durante os períodos de 1 s, 1 min, 5 min e 1 h. Das indústrias analisadas, alguns resultados podem ser destacados, tais como:

- a. Nas indústrias químicas, os custos das perdas chegaram em US\$ 250.000 para uma interrupção da energia elétrica durante o período de 1 h, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2: Custo das perdas nas indústrias químicas no período de 1 h.

Fonte: Adaptado de (MELO; CAVALCANTI, 2012).

Das perdas calculadas, os valores mais significativos foram de 72 % referentes aos custos associados às perdas dos produtos não vendidos, 12 % com perdas de matérias primas ou produtos primários deteriorados e 10 % referentes aos custos utilizados para a retomada do ritmo normal da produção;

- b. Para as indústrias de alimentos analisadas, o custo das perdas variaram de US\$ 7.500 a US\$ 8.500 para uma interrupção da energia elétrica durante o período de 1 h. Os custos das perdas por consumo durante o período de 1 s até 1 h são apresentados na Figura 3.

Figura 3: Custo das perdas/consumo de energia nas indústrias de alimentos.

Fonte: (MELO; CAVALCANTI, 2012).

Neste caso, os custos associados são referentes às perdas de material durante o processo de manufatura (27 %), geração própria de energia (26 %), perdas de informações em computadores (26 %) e custos relativos aos reparos ou compra de novos equipamentos (21 %);

- c. No caso das indústrias mecânicas, os custos das perdas para uma interrupção da energia elétrica durante o período de 1 s foi de US\$ 75.000 e US\$ 200.000 para o período de 1 h. Na Figura 4, são apresentados os custos das perdas por consumo durante o período de 1 s até 1 h.

Figura 4: Custo das perdas/consumo de energia nas indústrias mecânicas.

Fonte: (MELO; CAVALCANTI, 2012).

No contexto delineado, ressalta-se que o perfil das cargas no setor industrial brasileiro é constituído em sua maioria pelas máquinas elétricas, representando 62 % do consumo de energia elétrica, e 25 % do consumo total de eletricidade no país, as quais, para esta pesquisa, são retratadas pelos Motores de Indução Trifásicos (MITs) (ELETROBRAS, 2014). Adiciona-se nesta informação que dentre os fenômenos relacionados à QEE, destacam-se os afundamentos de tensão, transitórios e interrupções momentâneas que representam 92 % da maioria dos problemas observados nas plantas industriais (WANG; WANG, 2013; DUGAN et al., 2002).

Os afundamentos de tensão, normalmente, acontecem devido às situações de faltas (curtos-circuitos) caracterizadas nos sistemas de transmissão e/ou distribuição de energia elétrica. Como fato, tais sistemas sempre estão expostos às adversidades externas, como por exemplo, descargas atmosféricas, acidentes ou falhas de equipamentos (LEIRIA et al., 2006; DUGAN et al., 2002).

Somando-se à severidade dos afundamentos, observa-se que os ajustes dos dispositivos de proteção associados aos circuitos poderão atuar e/ou provocar paradas inesperadas do sistema como um todo. Como fato, tem-se que estes problemas podem ser minimizados ou até mesmo evitados por adequadas parametrizações dos ajustes dos dispositivos de proteção associados aos MITs (LEIRIA et al., 2006; FELCE; MATAS; SILVA, 2004).

No contexto desta pesquisa, vale ressaltar que para um MIT de grande porte, uma parada não programada devido a um distúrbio de QEE acarretará, como já apresentado, em altos custos financeiros ao consumidor industrial. Na tentativa de amenizar os riscos de paradas inesperadas, estudos demonstram a aplicação de técnicas intrusivas e não intrusivas para um constante monitoramento dos MITs. Dos problemas analisados, destacam-se, por exemplo, os desgastes mecânicos dos rolamentos, alto aquecimento nas barras do rotor e enrolamentos do estator quando da máquina em funcionamento a plena carga (ZHANG et al., 2011).

Coloca-se então, que os analisadores (medidores) e/ou os multimedidores de QEE usualmente empregados em campo, poderiam auxiliar no diagnóstico destes problemas se fossem preparados para trocar informações com os demais equipamentos associados e, assim, prevenir paradas desnecessárias.

Contudo, usualmente, no que diz respeito ao monitoramento da QEE, os analisadores e multimedidores alocados sobre o SEP estão inseridos numa estrutura para apenas registrar, analisar e armazenar os dados quando da detecção de um evento. Posteriormente, uma análise mais refinada pode ser conduzida (BERNARDES; AYELLO, 2008). Portanto, pela literatura até o momento consultada, não se observa a atribuição de nenhuma função ou tarefa para ação imediata sobre o SEP, seja uma ação decisória, ou informativa para outros processos que se sirvam da informação prestada para prevenir a respeito da situação incidente, ou de futuras situações, no ponto de ocorrência.

Já no caso do *Intelligent Electronic Device* (IED), este é inserido na estrutura para a

ação de proteger o elemento (componente ou parte do sistema) em questão. Neste caso em específico, o MIT, após detectado um evento. Porém, também não é capaz de prevenir uma parada desnecessária do equipamento protegido devido aos distúrbios associados à QEE, pois está parametrizado para atender somente aos requisitos da proteção. No entanto, vale frisar que muitos dos IEDs também possuem recursos que permitem a aquisição dos dados e armazenamento em um banco de dados central, permitindo uma posterior análise (BALZI, 2005).

Verifica-se então a necessidade em disponibilizar um sistema supervisorio, com capacidade para registrar, analisar e manifestar ao Sistema Elétrico Industrial (SEI), por meio de um monitoramento remoto, a situação operacional enfrentada, bem como de repassar rapidamente as informações processadas ao IED associado como um subsídio para a tomada de decisão. Neste sentido, acredita-se que um constante monitoramento das tensões e correntes do MIT em um determinado ponto do SEI, promoverá subsídios para a correlação de certas informações que serão processadas pela QEE.

No intuito de colaborar com o contexto apresentado, nesta pesquisa, é proposta uma metodologia para diagnosticar e analisar a influência dos afundamentos e interrupções de tensão passíveis de ocorrência em um SEI. A metodologia proposta está baseada na utilização da Transforma *Wavelet* (TW) para a detecção e localização no tempo dos distúrbios, e na aplicação da Função Densidade de Probabilidade (FDP) e da Correlação Cruzada (CC) para classificar os eventos de forma não intrusiva, permitindo prover indicadores para os MITs.

Toda a abordagem está baseada nas características das assinaturas dos valores trifásicos das tensões e correntes em observação sobre o SEI e os motores em análise. Deve também ser destacado que após o processo de classificação dos eventos, o algoritmo como implementado e apresentado permite também a estimação do torque eletromagnético e da velocidade dos motores via a aplicação de RNAs.

1.1 Contribuições da Pesquisa

A principal contribuição desta tese é apresentar uma metodologia para o diagnóstico e análise da influência dos afundamentos e interrupções de tensão sobre os MITs, de forma não intrusiva, dispondo, principalmente, das ferramentas estocásticas FDP e CC. Cabe firmar que estas ferramentas não são usualmente aplicadas com foco na análise de Sistemas Elétricos de Potência.

No contexto delineado desta pesquisa, a metodologia poderá ser aplicada em um sistema supervisorio de manutenção industrial no diagnóstico e estimação de parâmetros para os MITs, dando abertura para futuras análises preditivas. Esta possibilidade de aplicação, decorre das ferramentas utilizadas nesta tese, que são a TW (para a detecção dos eventos), FDP e CC (para a classificação dos eventos), e RNAs (para a estimação do

torque eletromagnético e da velocidade dos MITs), as quais são passíveis de implementação em software e hardware.

Deve também ser destacado que a metodologia como concebida e implementada poderá auxiliar na indicação de possíveis problemas na operação dos MITs, abrindo espaço para uma reavaliação das informações provenientes de analisadores de qualidade da energia elétrica, e ou as que possam ser direcionadas para os IEDs associados.

Não é demais colocar que a metodologia proposta poderá ser aplicada no desenvolvimento de um novo equipamento que contemple as funções de monitoramento e análise da operação de MITs.

1.2 Estrutura do Trabalho

A apresentação do documento que segue, respeitará a seguinte ordem.

No Capítulo 2, tem-se a revisão bibliográfica apresentando publicações significativas que abordam a evolução do tema, procurando demonstrar as técnicas e métodos até então encontrados na literatura correlata.

No Capítulo 3, apresenta-se o aporte teórico sobre as ferramentas matemáticas, como, a Transformada *Wavelet*, Processo Estocástico, e do sistema inteligente, a Rede Neural Artificial, ferramentas estas que serão utilizadas na concepção e apresentação da metodologia proposta.

O Capítulo 4 apresenta as informações relacionadas ao monitoramento de QEE existentes atualmente, os IEDs associados aos MITs, e a metodologia proposta para o diagnóstico e análise da influência dos afundamentos e interrupções de tensão nos MITs.

O Capítulo 5 traz a apresentação e discussão dos resultados, e o Capítulo 6 as conclusões e sugestões para a continuidade da pesquisa.

Revisão Bibliográfica

Este capítulo visa apresentar algumas das publicações mais significativas que abordam a evolução do tema, demonstrando os métodos e técnicas encontradas até o momento na literatura correlata.

2.1 Ferramentas Estocásticas

Cabe adiantar que nesta seção serão apresentados trabalhos que utilizam a autocorrelação e a correlação cruzada em áreas diferentes da aplicação desta tese, visto que até o momento não foram localizados trabalhos com foco em Sistemas Elétricos de Potência (SEP). Mesmo assim, vale frisar que os trabalhos aqui apresentados serviram de apoio teórico e prático na aplicação destas ferramentas, principalmente quando da concepção e desenvolvimento do algoritmo de classificação implementado nesta tese.

A utilização do ruído de *dithering* na linearização de correladores digitais por meio da aplicação de técnicas de correlação é apresentado por Granado (1994). O autor mostra que o emprego de quantizadores com um pequeno número de *bits* permite obter a medida dentro dos limites controláveis de erro quando da correlação entre os sinais. Neste trabalho, é demonstrada, a utilização das ferramentas estocásticas autocorrelação e correlação cruzada aplicadas na análise de erro do estimador. Comenta-se que o processo de cálculo da correlação envolve somente atrasos e multiplicações de amostras dos sinais, tendo como vantagem sua simplicidade quando implementada em um correlador.

O trabalho apresentado por Borges (2009) teve como objetivo estudar sinais de atividades elétricas neuronais. Tais sinais são registrados por *Multielectrode Array* (MEA), sendo uma atividade espontânea de grupos neuronais com culturas *in vitro*. Os sinais registrados por meio das matrizes MEA podem conter ruídos, prejudicando qualquer análise informativa que os sinais possam fornecer para os pesquisadores em neurociência. Para tal verificação, utilizou-se da função de autocorrelação e da densidade espectral de potência, permitindo uma análise do sinal no tempo e frequência. Desta forma, as ferramentas apli-

cadascuma foram capazes de identificar características semelhantes ao ruído branco presentes nos sinais.

Em análises e implementações de técnicas para as medições de micro e nanovibrações, conforme explicado por Berton (2013), deve-se primeiro quantizar o nível de ruído presente no sistema. Desta forma, identificar quais os tipos de ruídos que afetam o sistema, é primordial para tentar diminuir a influência destas fontes causadoras de ruído. Neste trabalho, são apresentados importantes conceitos de processos estocásticos no intuito de modelar o ruído térmico, ruído de quantização e ruído quântico. Como exemplo, o conceito de processo estocástico foi utilizado para modelar o ruído térmico, onde este tipo de ruído é causado pelo movimento randômico de partículas carregadas em um meio condutivo. Na pesquisa apresentada, o ruído térmico foi modelado como um ruído branco, com uma densidade espectral de potência constante.

2.2 Analisadores de Qualidade da Energia e Relés de Proteção

Esta seção apresenta os trabalhos relacionados ao monitoramento de QEE e ao IED usualmente associado ao MIT.

Em Hart et al. (2000), os autores ressaltam a importância dos relés de proteção como componentes vitais ao bom e correto funcionamento do SEP, incentivando a integração destes equipamentos inteligentes como recursos para o monitoramento de indicadores de QEE para as situações de afundamentos, elevações e interrupções de tensão, bem como para as distorções harmônicas. Conforme ressaltado pelos autores, a integração entre os relés de proteção e os analisadores de QEE refletirá em economia técnico-financeira devido aos múltiplos pontos desejáveis de monitoramento em comum, provendo informações concisas quando da ocorrência de eventos associados à QEE.

Ghandehari e Jalilian (2004), enfatizam que desde a década de 80 existem estudos refletindo o impacto econômico nos consumidores industriais devido aos problemas associados a falta de QEE. Neste estudo a análise econômica está baseada na melhoria do fator de eficiência. Pelos autores, o fator de correção dependerá da relação entre os impactos econômicos e a QEE, sendo obtido conforme a determinação das cargas. Desta forma foi proposto um procedimento correlacionando os parâmetros econômicos com a QEE, onde o custo da melhoria do desempenho é comparado com os investimentos requeridos para implementação da QEE.

Balzi (2005) descreve os desafios no desenvolvimento de um sistema de monitoramento da QEE e apresenta algumas soluções baseadas no uso de funções disponíveis nos relés de proteção microprocessados. Segundo o autor, tais funções de proteção e controle, quando combinadas com esquemas lógicos programáveis, podem ser usadas para detectar, gravar e analisar diferentes eventos relacionados à qualidade da energia. Ainda pelo autor, fica

clara a redução do efeito causado pelos curtos-circuitos sobre cargas industriais sensíveis à falta de QEE, a partir de uma adequada aplicação dos relés e filosofias de proteção.

Lisowiec, Nowakowski e Kolodziejczyk (2008) apresentam a possibilidade de implementar funções de QEE em um relé de proteção convencional por meio do desenvolvimento de um algoritmo que calcula o espectro de frequência em tempo real do conteúdo harmônico e inter-harmônico dos sinais de tensão e corrente até 2 kHz. Pela pesquisa, demonstra-se que a arquitetura básica do analisador de QEE é similar a arquitetura do relé de proteção digital, sendo enfatizado que o algoritmo do relé de proteção digital possui somente a função da proteção, diferindo assim, do analisador de QEE, que contém um algoritmo estatístico para a função de análise. Desta forma, quando da utilização do algoritmo proposto e desenvolvido pela aplicação das técnicas avançadas de processamento de sinais, tem-se como principal vantagem a utilização de um *hardware* de menor custo, contendo ambas as funções de analisador de QEE e proteção digital.

O trabalho apresentado por Bernardes e Ayello (2008) apresenta a filosofia de um sistema concebido para monitorar a QEE e realizar auditoria da energia elétrica adquirida pelas concessionárias, bem como subsidiar a indústria a tomar decisões no sentido de reduzir custos e otimizar o processo industrial. O conceito está baseado na aplicação de multimedidores digitais especialmente projetados para monitorar circuitos com cargas não-lineares, sendo combinados com o IED permitindo o monitoramento de todos os pontos do sistema. Outro ponto importante é a integração de multimedidores e relés de proteção permitindo associar algumas das perturbações em estudo com a atuação do sistema de proteção. Vale lembrar que, conforme ressaltado pelos autores, os relés de proteção possuem funções de monitoramento de grandezas e particularidades específicas para cada equipamento, contribuindo para o monitoramento da QEE no sistema como um todo. Por exemplo, para motor de indução trifásico de grande porte, um relé de proteção de última geração pode agregar funções indiretamente relacionadas à QEE como, relatórios de tendências, incluindo capacidade térmica, perfil de carga, tensão média e recursos de oscilografia, dentre outras funções.

Pereira e Kagan (2009) observaram a possibilidade de adicionar novas funções aos medidores eletrônicos de faturamento permitindo a detecção e registro de eventos que afetam a Qualidade da Energia Elétrica (QEE), visto que estes estão permanentemente conectados e distribuídos por toda a rede elétrica, possuindo canais de comunicação que podem ser disponibilizados mesmo que remotamente. No relato foram utilizadas várias técnicas de detecção como o valor eficaz, decomposição de sinais, Norma Euclidiana Instantânea (NEI) e a TW. Na pesquisa foram avaliados dois tipos de eventos: o Transitório Oscilatório (TO) e Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD). Segundo os autores as técnicas empregadas na pesquisa são compatíveis com as limitações de memória e processamento dos medidores atualmente empregados. Os algoritmos para a detecção dos eventos foram selecionados de modo a não provocar impacto no funcionamento do medi-

dor. As técnicas propostas mostraram-se eficazes, podendo ser utilizadas em medidores eletrônicos de faturamento sem a necessidade de alterações no seus circuitos, bastando apenas certas alterações em seu programa operacional.

Bernardes e Rocha (2009) chamam a atenção para a subutilização dos relés digitais de proteção na análise e diagnóstico preditivos. O trabalho procura mostrar a possibilidade de otimização da operação e ampliação da vida útil dos MITs sem a necessidade de investimentos em sistemas paralelos. Pelos autores, os relés não devem ser vistos somente como mecanismo para proteção dos sistemas e equipamentos, devendo ser considerados também como o IED para monitoramento, medição avançada e comunicação dos dados para centros de controle e operação remotos.

2.3 Qualidade da Energia Elétrica

Nesta seção são apresentados trabalhos retratando algumas das ferramentas de análises aplicáveis à qualidade da energia elétrica.

Oleskovicz et al. (2006) apresentaram um estudo comparativo entre ferramentas de análise aplicáveis à QEE, enfatizando a aplicação da Transformada de *Fourier* com Janela (TFJ), a TW e RNA. Das ferramentas apontadas, a TFJ e a TW se mostraram aplicáveis à detecção, localização e classificação de distúrbios agregados às formas de ondas de tensão em um sistema de distribuição, promovendo um diagnóstico preciso das situações enfrentadas. Os distúrbios foram classificados segundo sua natureza, utilizando-se de um módulo inteligente composto por uma RNA. Deve ser enfatizado que com apenas meio ciclo de pós-fenômeno, foi possível acusar o distúrbio por meio da TW e da TFJ, e de classificá-lo dispondo do módulo inteligente com base em uma RNA. Pelo que foi apresentado, todas as situações de distúrbios evidenciadas sobre o sistema foram corretamente classificadas pelo módulo inteligente.

Bollen et al. (2009) apresentam as tendências, descobertas e oportunidades nas pesquisas direcionadas para a QEE. Segundo os autores, quando da introdução de novas fontes de geração de energia nos sistemas de transmissão e de distribuição, haverá a necessidade de novas pesquisas em função da presença de variações na amplitude da tensão, emissão e ressonância harmônica, dentre outros problemas. Além deste, também fica claro pela pesquisa, a necessidade de métodos de análise automáticos devido ao aumento da quantidade de dados (informações) disponibilizado no contexto da qualidade de energia. Segundo os autores, com a real proliferação da geração distribuída, busca por uma melhor eficiência energética, e a intensificação do uso de novas tecnologias dispondo da eletrônica de potência, a integração e a complexidade dos SEP será inevitável, abrindo espaço para novos estudos e análises visando solucionar, ou pelo menos amenizar, os novos problemas manifestados.

Ando, Leborgne e Bretas (2009) apresentam uma metodologia para o cálculo e geren-

ciamento de indicadores de QEE via identificação e quantificação dos distúrbios eletromagnéticos utilizando técnicas de Processamento Digital de Sinais (PDS). Os principais distúrbios de QEE, como transitórios, variações e flutuações de tensão, distorções harmônicas, desequilíbrios de tensão e variações de frequência foram quantificados por meio de um algoritmo robusto atendendo às recomendações da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). Para a validação do trabalho apresentado, foi desenvolvido um programa computacional considerando formas de onda dos distúrbios sintetizadas e geradas pelo uso do *software* MATLAB.

Usida et al. (2009) tiveram como objetivo estudar os eventos de VTCD para detectar e localizar no tempo, bem como classificar os possíveis fenômenos associados a esta classe. Este estudo envolveu a aplicação de duas técnicas: o cálculo do valor eficaz e da TW. Pelo trabalho apresentado, o emprego da TW para a detecção e localização da VTCD propicia um refinamento em apontar o tempo de ocorrência das discontinuidades que podem estar presentes em um dado sinal, apontando a habilidade e potencialidade desta técnica para aplicações no monitoramento de sinais elétricos em tempo real. Para a etapa de classificação dos eventos, o valor eficaz apresentou simplicidade quando comparado à TW para discriminar entre os possíveis fenômenos associados a VTCD. Cabe ressaltar que o emprego do valor eficaz é muito difundido pelos fabricantes de equipamentos para análise e monitoramento da QEE.

Em Lieberman et al. (2011), os autores apresentam uma revisão das técnicas e metodologias desenvolvidas para análise da QEE em sistemas de transmissão e distribuição, buscando melhor classificar os distúrbios de energia analisados. De acordo com a revisão apresentada, as técnicas usualmente aplicadas para estimação dos indicadores de QEE são TW, Transformada-S (TS), Filtro de *Kalman* (FK), bancos de filtros e, algumas vezes, a combinação de duas delas. Já para a classificação dos eventos, a tendência é utilizar algoritmos baseados em Inteligência Artificial (IA) e Máquina de Suporte Vetorial (MSV), sendo lembrado que o principal problema para a aplicação destas últimas é o aumento do esforço computacional requerido e a grande quantidade de dados que devem ser analisados continuamente.

Os autores Kilter et al. (2012) apresentam uma revisão das práticas internacionais sobre o monitoramento da QEE. O principal objetivo do trabalho apresentado é criar um conjunto coerente de diretrizes para a prática do monitoramento em QEE. Pelos autores, as diretrizes devem passar pelos seguintes tópicos: o conhecimento dos principais objetivos para o monitoramento da QEE a ser efetuado; uma revisão literária do estado da arte no que diz respeito ao monitoramento da QEE; uma análise e seleção dos parâmetros representativos para o monitoramento; apresentação e processamento dos dados medidos; e exemplos de estudos e aplicações avançadas. Desta forma, evidencia-se a grande variedade de aplicações, metodologias e atividades de coordenação e unificação que são requeridas para o monitoramento da QEE. A pesquisa aponta também as principais questões que

necessitam ser mais bem estudadas como, a possibilidade e vantagens potenciais de uma instalação com a função de monitoramento voltada a um grande número de dispositivos de medição, e/ou relés de proteção, ou a utilização de metodologias para uma estimativa confiável de índices relevantes de QEE em locais não monitorados.

Santoso e Sabin (2012) apresentam a aplicação de uma ferramenta baseada em dados analíticos para análise de eventos de QEE por meio de dados capturados e armazenados por um sistema de monitoramento. O sistema de monitoramento de QEE é formado por diversos equipamentos, tais como, relés de proteção, medidores de faturamento e sensores de corrente conectados nos sistemas de transmissão e distribuição. Conforme colocado pelos autores, este conceito não é recente. A ideia foi proposta e aplicada de 1995 à 2000 para a detecção e identificação automática de eventos em SEP pelo *Electric Power Research Institute* (EPRI). Os resultados apresentados mostraram-se eficazes quando da ferramenta aplicada para detecção, interpretação e predição na avaliação de desempenho durante o chaveamento de bancos de capacitores no SEP. Os autores enfatizaram que esta ferramenta, pode ser utilizada na análise dos eventos em distúrbios de afundamento de tensão, para avaliar e prever o desempenho de um circuito de distribuição e identificar os fatores que irão melhorar o desempenho do mesmo.

Os autores Fan et al. (2012) apresentam técnicas para a análise automatizada dos vários tipos de dados coletados em um SEP, enfatizando a necessidade de um analisador inteligente capaz de classificar, identificar os tipos e as causas, bem como apontar a localização de curto-circuito, estimando todos os parâmetros envolvidos de forma automática. Para a classificação dos distúrbios, tem-se a possibilidade de desenvolver um algoritmo que classifique automaticamente todos os eventos baseado na análise das formas de onda da tensão e corrente, sendo estas gravadas nos formatos *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) *Common Format for Transient Data Exchange* (COMTRADE) ou *Power Quality Data Interchange Format* (PQDIF). Desta forma, aplicam-se as técnicas da Transformada de *Fourier* (TF), TW ou TS para extrair as características distintas dos sinais em análise e, posteriormente, utilizar as ferramentas inteligentes SF, RNA ou *neuro-fuzzy* para a tomada de decisão da classificação dos distúrbios. Outros enfoques também são apresentados pelos autores, como a identificação da causa da falta, ou a localização da falta, mas deve ficar clara a importância da integração destes módulos com os sistemas *Energy Management System* (EMS) ou *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) para melhorar a acuracidade das análises no SEP.

Em Goedtel et al. (2013) é apresentada uma aplicação por meio de Redes Neurais Artificiais para estimar a velocidade do motor de indução trifásico baseado nas medições das tensões e correntes. A execução de medidas diretas da velocidade no motor compromete o sistema de controle e o circuito de partida, reduzindo sua robustez e aumentando os custos de implementação. Desta forma, é proposta a estimação da velocidade do motor de indução baseado em RNAs com alimentação senoidal, considerando os problemas da

energia elétrica como a variação da tensão nominal em uma ampla faixa de operação do conjugado de carga, no transitório e no regime permanente. Cada faixa de tensão possui uma RNA associada com características idênticas, mas cada rede é treinada em uma faixa de operação de tensão e sua seleção é feita de acordo com o nível de tensão eficaz da rede trifásica. Os resultados demonstraram que a RNA não apresentou uma boa resposta de generalização, melhorando com o incremento da velocidade. Já em regime permanente, os resultados convergiram para valores muito próximos do valor medido, com erros inferiores a 2 %.

Os autores Palacios et al. (2014) enfatizam que o torque é a principal variável envolvida no comportamento mecânico dos motores de indução trifásicos podendo ser utilizado no diagnóstico de uma falta, no monitoramento da eficiência energética da máquina projetando uma determinada carga acoplada no eixo. Caso haja um desbalanceamento de tensão entre os enrolamentos do estator da máquina, torques eletromagnéticos oscilatórios aparecerão em diversos modos de operação. Sendo assim, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema baseado em RNA que estime o torque eletromagnético do motor de indução trifásico. O método proposto utiliza as tensões e correntes trifásicas como parâmetros de entrada no domínio do tempo e considera possíveis desbalanceamentos assimétricos das tensões. Conforme apresentado pelos autores, a RNA com arquitetura *Perceptron Multi Camada* (PMC) implementada foi testada com resultados experimentais em dois motores de indução de diferentes potências obtendo bons resultados na etapa de validação.

Neste capítulo, apresentou-se um panorama geral sobre as principais abordagens propostas para o monitoramento da QEE por meio da utilização de um analisador/multimedidor e um relé de proteção digital, partindo-se do pressuposto que as informações coletadas são armazenadas em um banco de dados central. Todavia, observa-se pelos relatos apresentados que tais dados somente são analisados após a falta.

Como fato importante a ser observado é que os trabalhos abordam a tendência da ação combinada entre o analisador e o IED para a análise dos distúrbios de QEE no SEP. Desta forma, a aplicação de ferramentas inteligentes para a análise rápida por meio de um monitoramento remoto é atrativa para a criação de indicadores de QEE, os quais poderão ser incorporados a um procedimento preditivo e de decisão, vindo a dar suporte ao sistema de proteção do MIT, desde que haja tempo suficiente e um adequado processamento para tal.

O capítulo seguinte (capítulo 3) apresentará um descritivo teórico sobre as ferramentas matemáticas TW, Processo Estocástico (PE) e do sistema inteligente RNA. Estas ferramentas serão utilizadas no decorrer deste trabalho para responder frente aos objetivos inicialmente levantados.

Referencial Teórico

A Transformada *Wavelet* ou *ondaletas* é uma ferramenta contemporânea muito utilizada por pesquisadores com aplicações relevantes nas áreas de estatística, processos estocásticos, processamento de sinais, música, matemática, engenharia e compressão de imagens (ADDISON, 2002). A TW é considerada uma ferramenta alternativa aos métodos já utilizados, como a tradicional Transformada de *Fourier*.

Já para a Ferramenta Estocástica, o Processo Estocástico (PE) é um fenômeno aleatório que surge por meio de um processo qualquer que se desenvolve ao longo do tempo, sendo este controlado pelas leis probabilísticas (PARZEN, 1999).

No que diz respeito aos sistemas inteligentes, estes são atualmente utilizados em diversas aplicações, tais como: classificação de padrões, reconhecimento facial, controle de máquinas, avaliação de imagens e previsão de tendências. Dentre os sistemas inteligentes existentes, encontra-se a RNA, tendo como características atrativas sua aplicação em variados tipos de problemas, demonstrando habilidades no mapeamento de sistemas não-lineares e aprendizagem de comportamentos a partir de informações (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

A seguir é apresentado um descritivo teórico sobre as ferramentas matemáticas TW, PE e das RNAs, ferramentas estas que serão utilizadas no decorrer deste trabalho.

3.1 Transformada *Wavelet*

A TW é muito utilizada na análise de sinais aperiódicos, ruidosos, intermitentes e transitórios, simultaneamente nos planos tempo e frequência. Esta ferramenta obtém boa eficiência quando comparada a outras ferramentas empregadas para esta finalidade (ADDISON, 2002).

Desde a introdução do conjunto de funções ortogonais em 1910 por Harr, o conceito de ondaletas ou *wavelets* obteve seu reconhecimento somente na década de 1980, a partir da sua aplicação em diversas áreas como física, matemática e engenharia.

As análises executadas por meio da TW se utilizam de funções que representam pequenas formas de onda (ondaletas). Tais funções são manipuladas/executadas movendo-se, com dilatação e/ou compressão, sobre o sinal em estudo.

Neste contexto, essa seção apresenta a teoria básica sobre a TW e algumas de suas perspectivas de aplicações.

3.1.1 Funções *Wavelets*

As funções *wavelets* são manipuladas por meio de processos de translações (movimentos sobre o sinal no tempo) e de dilatações e/ou contrações, os quais transformam o sinal em outra forma de onda com desdobramentos no tempo e em escalas. Tais funções possuem a forma de pequenas ondas (ondaletas), sendo estas localizadas no tempo.

Conforme apresentado na Figura 5, existe uma variedade de *wavelets* que podem ser escolhidas e utilizadas na análise do sinal. A escolha da melhor *wavelet* a ser utilizada na aplicação depende tanto da natureza do sinal, quanto dos requisitos de análises que serão necessários (ADDISON, 2002).

Figura 5: Formas básicas de algumas funções *wavelets*.

Fonte: (BRANCO, 2009).

Para dar origem a uma família de *wavelets*, as funções $\Psi(t)$ devem satisfazer certas condições matemáticas (ADDISON, 2002), tais como:

1. A *wavelet* tem que ser absolutamente integrável:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Psi(t) dt < \infty \quad (1)$$

2. A *wavelet* tem que ter energia finita e ser preservada pela análise:

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} |\Psi(t)|^2 dt < \infty \quad (2)$$

na prática, as funções são normalizadas para que sua energia seja unitária.

3. A condição de admissibilidade deve ser respeitada, conforme a equação a seguir:

$$C_g = \int_0^\infty \frac{|\Psi(F)|^2}{f} df < \infty \quad (3)$$

na qual $\Psi(F)$ é a Transformada de *Fourier* de $\Psi(t)$.

4. As *wavelets* complexas não possuem componentes de frequência negativa.

3.1.2 A Transformada *Wavelet* Contínua

Para encontrar a *wavelet* mãe são necessárias duas operações básicas para torná-la mais flexível, sendo estas por meio do procedimento de dilatação e de translação. A dilatação da *wavelet* é controlada pelo parâmetro de dilatação $\mathbf{a}$. Já o movimento da *wavelet* ao longo do sinal é controlado pelo parâmetro de translação $\mathbf{b}$. A função $\Psi(t)$ pode ser escrita em termos de $\mathbf{a}$ e $\mathbf{b}$, conforme apresentado em $\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$. Nesta condição, a *wavelet* mãe original possui $\mathbf{a} = 1$ e $\mathbf{b} = 0$.

As Figuras 6 e 7 apresentam os procedimentos de dilatação e translação às funções base *Gaussiana* e *Hat Mexicana*, respectivamente.

Figura 6: Dilatação de uma *wavelet*.

Fonte: (BRANCO, 2009).

Assim, a equação 4 representa a TW de um sinal contínuo, para uma faixa de valores de $\mathbf{a}$ e de $\mathbf{b}$.

Figura 7: Translação de uma *wavelet*.

Fonte: (BRANCO, 2009).

$$T(a, b) = w(a) \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (4)$$

Na qual $w(a)$ é a função de peso definida como $\frac{1}{\sqrt{a}}$, em razão da conservação da energia do sinal $x(t)$. Sendo assim, a Transformada *Wavelet* Contínua (TWC) é a correlação cruzada do sinal com um conjunto de *wavelets* com variadas larguras (dilatadas ou contraídas) (ADDISON, 2002).

De modo análogo à Transformada de *Fourier* (TF), a TWC possui uma transformada inversa, sendo esta definida conforme a equação 5 (ADDISON, 2002).

$$x(t) = \frac{1}{C_g} \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} D(a, b) \Psi_{a,b}(t) \frac{da db}{a^2} \quad (5)$$

onde C_g é a condição de admissibilidade. Portanto, o sinal original é recuperado a partir de sua transformada pela integração desta, para todas as escalas e localidades, ou seja, em a e b (Addison, 2002).

3.1.3 A Transformada *Wavelet* Discreta

A função *wavelet* anteriormente apresentada foi definida de maneira contínua em termos dos parâmetros de escala e de dilatação. Contudo, na prática os valores dos parâmetros podem ser discretizados conforme apresentado na equação 6 (ADDISON, 2002).

$$\Psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{a_0^m}} \Psi \left(\frac{t - nb_0 a_0^m}{a_0^m} \right) \quad (6)$$

onde m e n , são os parâmetros inteiros que controlam a dilatação e a translação, respectivamente; a_0 é a constante de passo da dilatação com valor maior que 1; e b_0 é o parâmetro de localização com valor maior que zero.

A definição da TW de um sinal contínuo no tempo, $x(t)$, usando os valores discretizados das *wavelets* é apresentada na equação 7:

$$T_{m,n} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{1}{\sqrt{a_0^{m/2}}} \Psi \left(\frac{a_0^{-m} t - nb_0}{a} \right) dt \quad (7)$$

ou, na forma compacta, como:

$$T_{m,n} = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi_{m,n}(t) dt \quad (8)$$

Conforme descrito em (BRANCO, 2009), outra possibilidade é definir a Transformada *Wavelet* Discreta (TWD) na forma de produto interno (equação 9).

$$T_{m,n} = \langle x, \Psi_{m,n} \rangle \quad (9)$$

Os valores de saída da TWD caracterizam as altas frequências, que muitas vezes representam ruídos presentes no sinal e são conhecidos como coeficientes de detalhe (D) da TW. Por outro lado, as baixas frequências são representadas por meio dos coeficientes da aproximação (A), conforme descrito a seguir.

As *wavelets* discretas são associadas às funções conhecidas como escalas, as quais fornecem uma versão suavizada do sinal original, sendo chamada como *wavelet* pai (10) (ADDISON, 2002). A convolução da função escala com o sinal produzirá os coeficientes de aproximação (A) da TWD (11).

$$\Psi_{m,n}(t) = 2^{-m/2} \Phi(2^{-m}t - n) \quad (10)$$

$$A_{m,n}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Phi_{m,n}(t) dt \quad (11)$$

Pode-se reconstruir o sinal original de entrada, $x(t)$, por meio da combinação dos seus coeficientes de aproximação com os seus coeficientes de detalhe, como apresentado pelas equações de 12 à 14.

$$x_m(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{m,n} \Phi_{m,n}(t) \quad (12)$$

$$d_m(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} D_{m,n} \Psi_{m,n}(t) \quad (13)$$

$$x(t) = x_{m_0}(t) + \sum_{m=-\infty}^{m_0} d_m(t) \quad (14)$$

sendo $x_m(t)$ uma versão suavizada do sinal original reconstruído a partir de sua aproximação de nível m , conforme apresentado na equação 12. $d_m(t)$ apresentado na equação 13, é a aplicação da TWD inversa ao detalhe de nível m .

Por meio da equação 14, verifica-se que a reconstrução do sinal original é devido a sua aproximação de nível m_0 , adicionada aos sucessivos detalhes. Sendo assim, a obtenção de sucessivos níveis de aproximações e detalhes do sinal original consiste no algoritmo de Análise Multiresolução (AMR) (ADDISON, 2002). A partir da equação 14, verifica-se que adicionando o detalhe de nível m à sua aproximação de mesmo nível, obtém-se a aproximação do sinal em uma escala anterior de $m - 1$.

$$x_{m-1}(t) = x_m(t) + d_m(t) \quad (15)$$

A interpretação do resultado da aplicação das funções Φ e Ψ em um sinal de entrada leva à conclusão de que estas funções representam, respectivamente, um filtro passa-altas e um passa-baixas (ADDISON, 2002).

Addison (2002) ainda comenta que, na prática, os sinais de entrada $x(t)$ para as funções Φ e Ψ são sinais discretizados no tempo, em que o comprimento N do sinal de entrada discretizado deve ser potência de 2, dado por $N = 2^M$. Desta forma, o número de níveis que pode ser obtido em uma AMR está compreendido em $0 < m < M$ (BRANCO, 2009).

3.1.4 Implementação da Transformada *Wavelet* Discreta

Conforme exposto em (WALKER, 1999), pode-se aplicar a TW em SEP por meio da implementação de banco de filtros, sendo que do ponto de vista prático, a TWD faz parte de um processo de filtragem digital no domínio do tempo, via convolução discreta e acompanhada do operador *downsampling* (reduzindo o número de amostras) por 2.

Pela Figura 8, ilustram-se os vários níveis de decomposição de um sinal pela aplicação da TWD. Inicialmente o sinal é filtrado por filtros passa-baixas (h) e passa-altas (g), sendo então aplicado o operador *downsampling* na saída de cada filtro. Deste processo resulta a decomposição do sinal em diferentes níveis, sendo que cada nível da faixa de frequência é dividida ao meio. A obtenção destes níveis de decomposição do sinal resultará no processo conhecido como AMR (BRANCO, 2009).

Figura 8: A decomposição de um sinal pela TW.

Cabe frisar que o filtro passa-baixas sempre fornecerá a aproximação do sinal, pois desempenha o papel da função Φ , e o filtro passa-altas tem a mesma função de Ψ , forne-

cendo o detalhe do sinal original. O sinal resultante da filtragem é dado pela concatenação da aproximação com os detalhes. Já a TWD de um sinal não é única, uma vez que depende do filtro passa-baixas e do filtro passa-altas utilizados. Sendo assim, um parâmetro chave para trabalhar com a TW é a escolha da *wavelet* mãe que será empregada.

Os autores em Baran e Kim (2006) explicam que a família *Daubechies* geralmente é uma boa escolha para a maioria das situações presenciadas em um SEP. Isto é verdade, por identificarem melhor os fenômenos com decaimentos e oscilações rápidas, além de transitórios, características típicas dos eventos usualmente encontrados em um SEP.

Verifica-se também que *wavelets* com suporte menor (filtros com poucos coeficientes) são ideais para localizar fenômenos no tempo. Já fenômenos com variações mais lentas, como afundamentos e elevações de tensão, podem ser melhor identificados por *wavelets* com maior quantidade de coeficientes (BRANCO, 2009).

3.1.5 A Transformada *Wavelet Packet*

A TWP discreta consiste na generalização da TW, na qual os filtros são aplicados sempre à aproximação do sinal e ao detalhe, resultando no desenvolvimento completo da árvore de coeficientes (JENSEN; HARBO, 2000), como ilustrado na Figura 9.

Tal abordagem resulta em uma melhor resolução no domínio da frequência, possibilitando uma melhor extração das características desejadas na aplicação. A Tabela 1 exemplifica como ocorre a divisão da frequência quando da aplicação da TWP.

Figura 9: Árvore de coeficientes quando da aplicação da TWP até o terceiro nível.

3.2 Ferramenta Estocástica

A teoria da probabilidade é considerada como o estudo dos modelos matemáticos de um fenômeno aleatório, sendo este definido como um fenômeno empírico que obedece às leis probabilísticas. Um fenômeno aleatório que surge por meio de um processo qualquer

Tabela 1: Faixas de frequência da aplicação da TWP ilustrada na Figura 9.

Folha	Número de amostras	Faixa de frequência (Hz)
Sinal de entrada	N	$0 \sim f$
$A_{1,1}$	$\frac{N}{2}$	$0 \sim \frac{f}{2}$
$D_{1,1}$	$\frac{N}{2}$	$\frac{f}{2} \sim f$
$A_{1,2}$	$\frac{N}{4}$	$0 \sim \frac{f}{4}$
$D_{1,2}$	$\frac{N}{4}$	$\frac{f}{4} \sim 2\frac{f}{4}$
$A_{2,2}$	$\frac{N}{4}$	$2\frac{f}{4} \sim 3\frac{f}{4}$
$D_{2,2}$	$\frac{N}{4}$	$3\frac{f}{4} \sim f$
$A_{1,3}$	$\frac{N}{8}$	$0 \sim \frac{f}{8}$
$D_{1,3}$	$\frac{N}{8}$	$\frac{f}{8} \sim 2\frac{f}{8}$
$A_{2,3}$	$\frac{N}{8}$	$2\frac{f}{8} \sim 3\frac{f}{8}$
$D_{2,3}$	$\frac{N}{8}$	$3\frac{f}{8} \sim 4\frac{f}{8}$
$A_{3,3}$	$\frac{N}{8}$	$4\frac{f}{8} \sim 5\frac{f}{8}$
$D_{3,3}$	$\frac{N}{8}$	$5\frac{f}{8} \sim 6\frac{f}{8}$
$A_{4,3}$	$\frac{N}{8}$	$6\frac{f}{8} \sim 7\frac{f}{8}$
$D_{4,3}$	$\frac{N}{8}$	$7\frac{f}{8} \sim f$

e que se desenvolve ao longo do tempo, sendo este controlado pelas leis probabilísticas, é chamado de Processo Estocástico (PE) (PARZEN, 1999).

Os modelos matemáticos podem ser utilizados para descrever fenômenos físicos da natureza abrangendo as ciências físicas e as engenharias, onde estão divididos em duas classes distintas, sendo, determinísticos e não-determinísticos (estocásticos):

- ❑ Modelo Determinístico - quando não há incertezas de seu comportamento em função do tempo em qualquer instante;
- ❑ Modelo Não-determinístico ou Estocástico - quando é regido pelos termos probabilísticos, pelos quais a probabilidade de um valor futuro está situada entre dois limites específicos.

A aplicação de um modelo determinístico para os diversos problemas encontrados no mundo real não é adequado, pois os fenômenos físicos existentes na natureza envolvem fatores desconhecidos. Desta forma, é necessário aplicar um modelo estocástico para análise de tais fenômenos a serem estudados (HAYKIN, 2004).

Somente para ilustrar, segue a Figura 10 contendo alguns exemplos de aplicações na engenharia que utilizam um modelo estocástico para análise dos fenômenos físicos.

Figura 10: Exemplos de aplicações na engenharia que utilizam um modelo estocástico.

Fonte: Adaptado de (LI, 1999).

Um Processo Estocástico (PE) possui propriedades em função do tempo e que são aleatórias, não sendo possível definir com exatidão as formas de ondas que serão observadas no futuro, antes de se realizar um experimento qualquer. Ao descrever um experimento qualquer, ou seja, aleatório, é conveniente pensar em termos de um espaço amostral (S), pois cada resultado de um experimento está associado com um ponto amostral (ζ). Sendo assim, a totalidade dos pontos amostrais correspondentes ao conjunto de todos os resultados possíveis do experimento é chamado de espaço amostral, e cada ponto do espaço amostral faz parte de uma função no tempo (HAYKIN, 2004).

Desta forma, atribui-se para cada ponto amostral (ζ) uma função no tempo, conforme apresentado na equação 16:

$$X(t, \zeta), -T \leq t \leq T \quad (16)$$

onde $2T$ é o intervalo total de observação.

A Figura 11 ilustra um conjunto de funções amostrais com $x_k(t) | k = 1, 2, \dots, n$.

Por intermédio da Figura 11, verifica-se que o conjunto de números da equação 17 constitui uma Variável Aleatória (VA).

Figura 11: Conjunto de funções amostrais.

Fonte: Adaptado de (HAYKIN, 2004).

$$x_1(t_k), x_2(t_k), \dots, x_k(t_k) = X(t_k, \zeta_1), X(t_k, \zeta_2), \dots, X(t_k, \zeta_n) \quad (17)$$

Então, um conjunto indexado $\mathbf{X}(t, \zeta)$ de variáveis aleatórias é chamado de PE. Pode-se então distinguir VA de PE, por:

- Variável Aleatória - o resultado de um experimento aleatório é associado a um número.
- Processo Estocástico - o resultado de um experimento aleatório é associado a uma forma de onda que é uma função do tempo.

3.2.1 Processo Estacionário

Em se tratando da utilização de modelos matemáticos que descrevam os processos físicos, a introdução de suposições é necessária para a obtenção das propriedades probabilísticas e estatísticas desejáveis. Neste caso, uma suposição que é normalmente feita é a de estacionariedade para os PE (MORETTIN, 2014).

Um processo estacionário é a derivação de um fenômeno físico estável que evolui para um modo de comportamento de regime permanente, ao passo que um processo não-estacionário provém de um fenômeno instável (HAYKIN, 2004).

A partir deste ponto, segue a demonstração matemática para comprovação da estacionariedade de um PE.

Primeiramente, considere um processo aleatório $\mathbf{X}(t)$ que seja iniciado em $t = -\infty$.

Admite-se que $\mathbf{X}(t_1), \mathbf{X}(t_2), \dots, \mathbf{X}(t_k)$ indicam as possíveis variáveis aleatórias de um PE nos respectivos tempos $t_1, t_2, \dots, t_k$.

A função de distribuição conjunta desse conjunto de variáveis aleatórias é representada por meio de $F_{\mathbf{X}(t_1), \dots, \mathbf{X}(t_k)}(x_1, \dots, x_k)$.

Posteriormente, se todos os tempos de observação forem deslocados por um valor fixo τ , obtém-se um novo conjunto de variáveis aleatórias, conforme demonstrado por $\mathbf{X}(t_1 + \tau), \mathbf{X}(t_2 + \tau), \dots, \mathbf{X}(t_k + \tau)$.

Comprova-se assim, que tal processo aleatório $\mathbf{X}(t)$, quando atende às condições descritas na equação 18 (para todos os deslocamentos de tempo τ e k , bem como para todas as escolhas possíveis de tempos de observação $t_1, t_2, \dots, t_k$), é reconhecido como estacionário no sentido estrito (*Strict Sense Stationary* (SSS)) ou estritamente estacionário (ORTIGUEIRA, 2005).

$$F_{\mathbf{X}(t_1+\tau), \dots, \mathbf{X}(t_k+\tau)}(x_1, \dots, x_k) = F_{\mathbf{X}(t_1), \dots, \mathbf{X}(t_k)}(x_1, \dots, x_k) \quad (18)$$

Verifica-se então, que o PE permanece com o mesmo comportamento probabilístico durante todo o tempo.

Por meio da análise da equação 18, há a possibilidade de distinguir duas situações distintas, sendo:

□ Para $k = 1$, tem-se:

$$F_{\mathbf{X}(t)}(x) = F_{\mathbf{X}(t_1+\tau)}(x) = F_{\mathbf{X}}(x) \quad (19)$$

para todo t e τ .

Neste caso, para um processo aleatório estacionário, a sua função distribuição é de primeira ordem e independente do tempo.

□ Para $k = 2$ e $\tau = -t_1$ é:

$$F_{\mathbf{X}(t_1), \mathbf{X}(t_2)}(x_1, x_2) = F_{\mathbf{X}(0), \mathbf{X}(t_2-t_1)}(x_1, x_2) \quad (20)$$

para todo t_1 e t_2 .

Para este segundo caso, a função distribuição é de segunda ordem e o processo aleatório estacionário depende somente da diferença de tempo entre os tempos de observação.

Estas situações possuem grandes implicações na parametrização estatística de um processo aleatório estacionário, sendo discutido nos próximos itens.

3.2.2 Média

Considerando que o processo aleatório $\mathbf{X}(t)$ é estritamente estacionário, a equação 21 demonstra que o cálculo da média (μ) de um processo aleatório $\mathbf{X}(t)$ é definido por meio do valor esperado da variável aleatória obtida, observando-se o processo de um tempo t qualquer.

$$\mu_X(t) = E[\mathbf{X}(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x f_{X(t)}(x) dx \quad (21)$$

onde, $f_{X(t)}(x)$ é a FDP de primeira ordem do processo.

A partir da equação 19, verifica-se que $f_{X(t)}(x)$ é independente do tempo t , ou seja, a média de um processo estritamente estacionário é uma constante, conforme apresentado na equação 22, para todo t .

$$\mu_X(t) = \mu_X \quad (22)$$

3.2.3 Autocorrelação

A autocorrelação de um processo aleatório $\mathbf{X}(t)$ é definida como a expectativa do produto de duas variáveis aleatórias ($\mathbf{X}(t_1)$ e $\mathbf{X}(t_2)$), obtidas pela observação do processo nos tempos t_1 e t_2 , conforme demonstrado por meio da equação 23.

$$R_X(t_1, t_2) = E[\mathbf{X}(t_1)\mathbf{X}(t_2)] = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x_1 x_2 f_{X(t_1), X(t_2)}(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \quad (23)$$

onde $f_{X(t_1), X(t_2)}(x_1, x_2)$ é a função da densidade de probabilidade de segunda ordem do processo.

A partir da equação 20, deduz-se que $f_{X(t_1), X(t_2)}(x_1, x_2)$ é dependente da diferença entre os tempos observados t_1 e t_2 . Portanto, a função de autocorrelação de um processo estritamente estacionário depende somente da diferença de tempo $t_2 - t_1$ (HAYKIN, 2004), como segue:

$$R_X(t_1, t_2) = R_X(t_2 - t_1) \quad (24)$$

para todo t_1 e t_2 .

Já a função de autocovariância de um processo estritamente estacionário $\mathbf{X}(t)$ é:

$$C_X(t_1, t_2) = E[(X(t_1) - \mu_X)(X(t_2) - \mu_X)] = R_X(t_2 - t_1) - \mu_X^2 \quad (25)$$

A equação 25 demonstra que a função de autocovariância é dependente da diferença de tempo $t_2 - t_1$ para um processo estritamente estacionário $\mathbf{X}(t)$.

Desta forma, entende-se que a média e a função de autocorrelação são suficientes para descrever os dois primeiros momentos estatísticos de um processo estocástico. Portanto, na prática, o interesse deve ser em caracterizar o processo estocástico por um número pequeno de funções de distribuição e momentos, restringindo o estudo a momentos de baixa ordem, utilizando-se uma descrição parcial do processo fornecido por meio da média e da função de autocorrelação. Isto significa que a classe de estacionariedade do processo irá variar para um processo de segunda ordem, sendo este conhecido como estacionário em sentido amplo (*Wide Sense Stationary* (WSS)), ou fracamente estacionário. A partir de agora neste documento a classe será tratada como processo estacionário (HAYKIN, 2004; MORETTIN, 2014).

3.2.3.1 Propriedades da Função de Autocorrelação

Redefinindo a função de autocorrelação de um processo estacionário $\mathbf{X}(t)$ para uma notação mais conveniente, tem-se:

$$R_X(\tau) = E[X(t + \tau)X(t)] \quad (26)$$

para todo t .

Para esta função de autocorrelação, seguem algumas propriedades:

1. O valor médio quadrático do processo é obtido de $R_X(\tau)$, assumindo-se $\tau = 0$ na equação 26, sendo:

$$R_X(0) = E[X^2(t)] \quad (27)$$

2. A função de autocorrelação $R_X(\tau)$ é uma função par de τ , conforme a equação 28,

$$R_X(\tau) = R_X(-\tau) \quad (28)$$

Essa propriedade vem da equação 26, sendo definida como:

$$R_X(\tau) = E[X(t)X(t - \tau)] \quad (29)$$

3. A função de autocorrelação $R_X(\tau)$ tem sua magnitude máxima em $\tau = 0$, ou seja:

$$|R_X(\tau)| \leq R_X(0) \quad (30)$$

A função de autocorrelação possui um significado físico, o qual constitui um meio de descrever a interdependência de duas variáveis aleatórias separadas, obtidas por meio da observação de um processo aleatório em um tempo de τ segundos.

Desta forma, quanto mais rapidamente o processo aleatório $X(t)$ se modificar com o tempo, mais rapidamente a função de autocorrelação $R_X(\tau)$ decrescerá a partir de seu máximo $R_X(0)$ à medida que τ se elevar, conforme ilustra a Figura 12.

Figura 12: Função de autocorrelação de processos aleatórios com flutuações mais lentas e mais rápidas.

Fonte: (HAYKIN, 2004).

O decréscimo é caracterizado por um tempo de decorrelação τ_0 , de forma que para $\tau > \tau_0$, a magnitude da função de autocorrelação $R_X(\tau)$ permanece abaixo de algum valor prescrito. Define-se o tempo de decorrelação τ_0 de um processo estacionário de valor médio igual a zero como o tempo necessário para que a magnitude da função de autocorrelação $R_X(\tau)$ decresça até 1 % de seu valor máximo $R_X(0)$ (HAYKIN, 2004).

Conforme já descrito no capítulo 3, o Processo Estocástico (PE) refere-se aos fenômenos de natureza aleatória observados na Engenharia, que se manifestam de forma temporal ou espacial, permitindo sua análise por intermédio das ferramentas estatísticas. Então, é necessário a introdução de suposições para obter as propriedades estatísticas desejáveis, sendo normalmente suposto que o Processo Estocástico (PE) possui estacionariedade (MORETTIN, 2014).

Desta forma, o cálculo da média e da função de autocorrelação são suficientes para descrever os dois primeiros momentos estatísticos do PE comprovando o seu nível de estacionariedade. O interesse deve ser em caracterizar o processo estocástico por um número pequeno de funções de distribuição e momentos, restringindo o estudo a momentos de

baixa ordem, utilizando-se uma descrição parcial do processo fornecido por meio da média e da função de autocorrelação (HAYKIN, 2004).

Comprovação do nível de estacionariedade dos sinais em análise nesta pesquisa

Para comprovar o nível de estacionariedade dos sinais que foram utilizados neste trabalho, primeiro efetuou-se o cálculo da média do sinal em regime permanente e pós-falta em uma janela de dados de 1 ciclo, sendo individualmente calculado para cada fase do sinal trifásico em todos os tipos de faltas simuladas nos barramentos do SEI. As Figuras 13 e 14 demonstram os resultados obtidos para quinze sinais trifásicos.

Figura 13: Cálculo da média de um sinal de tensão trifásico em regime.

Fonte: Próprio autor.

Figura 14: Cálculo da média de um sinal de tensão trifásico de pós falta.

Fonte: Próprio autor.

Em seguida foi, calculada a autocorrelação entre os sinais em regime e pós falta, onde o resultado é o produto das médias calculadas para estes sinais, conforme demonstrado na Figura 15.

Figura 15: Cálculo da autocorrelação entre os sinais em regime e pós falta.

Fonte: Próprio autor.

Conforme anteriormente apresentado, a média de um processo estacionário é uma constante para todo instante t , e o produto das médias de duas variáveis aleatórias caracteriza a autocorrelação do processo nos instantes t_1 e t_2 . Desta forma, verifica-se por meio das Figuras 13 e 14 que a média dos sinais utilizados neste trabalho estão muito próximas do valor zero, caracterizando estes resultados como uma constante. A Figura 15 confirma esta resposta devido ao produto das médias.

Isto significa que a classe de estacionariedade do processo irá variar para um processo de segunda ordem, sendo este conhecido como estacionário em sentido amplo (WSS), ou fracamente estacionário (HAYKIN, 2004).

Desta forma, confirmando que os sinais a serem estudados neste trabalho são estacionários e fazem parte de um processo aleatório, as ferramentas estocásticas FDP e a CC podem ser utilizadas para a resolução da classificação dos eventos.

Somente lembrando, um processo estocástico é o resultado de um experimento aleatório (sinal aleatório) associado a uma forma de onda em função do tempo. Seja um sinal aleatório de tensão representado pelo conjunto de suas possíveis funções amostrais $\mathbf{X}(t, \zeta_1), \dots, \mathbf{X}(t, \zeta_n)$ dentro do espaço amostral $\mathcal{S}$, suas funções amostrais são dependentes da variação dos parâmetros $\zeta_1, \dots, \zeta_n$, onde uma variável aleatória $\mathbf{X}$ estará contida no resultado de um experimento aleatório pelo número $\mathbf{X}(\zeta)$ (HAYKIN, 2004; ORTIGUEIRA, 2005).

A distribuição de probabilidades de uma variável aleatória $\mathbf{X}$ pode ser especificada com a FDP, sendo que $f(x)$ pode ser usada para descrever a distribuição de probabilidades de uma variável aleatória $\mathbf{X}$ (MONTGOMERY; RUNGER; HUBELE, 2012).

A probabilidade de $\mathbf{X}$ estar entre $\mathbf{a}$ e $\mathbf{b}$ é determinada pela integral de $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ de $\mathbf{a}$ a $\mathbf{b}$, conforme apresentado na equação 31.

$$P(\mathbf{a} < \mathbf{X} \leq \mathbf{b}) = \int_a^b \mathbf{f}(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \quad (31)$$

Desta forma, um histograma é uma aproximação da FDP, e para cada intervalo do histograma, a área da barra é igual à frequência das medidas no intervalo. A frequência é uma estimativa da probabilidade de a medida cair no intervalo. Então, a área sob $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ ao longo de qualquer intervalo é igual à probabilidade verdadeira de a medida cair neste intervalo (MONTGOMERY; RUNGER; HUBELE, 2012; DEVORE, 2006; GANG et al., 2012).

Uma FDP fornece a descrição simples das probabilidades associadas a uma variável aleatória. Um ponto importante é que $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ é usada para calcular uma área que representa a probabilidade de $\mathbf{X}$ assumir um valor em $[\mathbf{a}, \mathbf{b}]$, conforme apresentado na Figura 16.

Figura 16: Probabilidade determinada, a partir da área sob $f(x)$.

Fonte: Adaptado de (MONTGOMERY; RUNGER; HUBELE, 2012).

A Figura 17 ilustra um histograma em forma de barras, apresentando-se os agrupamentos de um conjunto de dados em células (retângulos). A faixa dinâmica dos dados é dividida em um determinado número de células (retângulos) de mesmo "comprimento". A "altura" de cada célula é dada pela contagem do número de dados contidos na faixa (GANG et al., 2012).

Figura 17: Histograma que aproxima uma função densidade de probabilidade.

Fonte: Adaptado de (GANG et al., 2012).

A área de cada barra é igual à frequência do intervalo. Sendo assim, a área sob $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ ao longo de qualquer intervalo é igual à probabilidade do intervalo, conforme apresentado na Figura 17.

O histograma traduz a relação da frequência (número de ocorrência) versus a amplitude do sinal em análise no barramento do MIT, possibilitando a classificação do distúrbio pela observação do maior número de amostras (ocorrências) que se encontra nas amplitudes máximas do sinal em análise, conforme apresentada na Figura 18.

Figura 18: Histograma que aproxima uma função densidade de probabilidade.

Fonte: Próprio autor.

3.2.4 Correlação Cruzada

A partir da consideração que dois processos aleatórios $\mathbf{X}(t)$ e $\mathbf{Y}(t)$ possuem suas funções de autocorrelação $R_X(t, u)$ e $R_Y(t, u)$, definem-se as duas funções de correlação cruzada de $\mathbf{X}(t)$ e $\mathbf{Y}(t)$ como:

$$R_{XY}(t, u) = E[\mathbf{X}(t)\mathbf{Y}(u)] \quad (32)$$

$$R_{YX}(t, u) = E[\mathbf{Y}(t)\mathbf{X}(u)] \quad (33)$$

onde t e u indicam os dois valores de tempo nos quais os processos são observados.

Nesse caso, as propriedades de correlação dos dois processos aleatórios $\mathbf{X}(t)$ e $\mathbf{Y}(t)$ podem ser exibidas na forma matricial, sendo denominada como a matriz de correlação dos processos aleatórios $\mathbf{X}(t)$ e $\mathbf{Y}(t)$.

$$\mathbf{R}(t, u) = \begin{bmatrix} R_X(t, u) & R_{XY}(t, u) \\ R_{YX}(t, u) & R_Y(t, u) \end{bmatrix} \quad (34)$$

Se os processos aleatórios $\mathbf{X}(t)$ e $\mathbf{Y}(t)$ forem individualmente estacionários e conjuntamente estacionários, então a matriz de correlação será escrita como:

$$\mathbf{R}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_X(t) & \mathbf{R}_{XY}(t) \\ \mathbf{R}_{YX}(t) & \mathbf{R}_Y(t) \end{bmatrix} \quad (35)$$

onde $\tau = t - u$.

A função de correlação cruzada não é uma função par de τ como era a função de autocorrelação, nem tem um máximo na origem. Entretanto, obedece uma relação de simetria da seguinte forma:

$$\mathbf{R}_{XY}(\tau) = \mathbf{R}_{YX}(-\tau) \quad (36)$$

A correlação cruzada entre dois sinais é uma ferramenta que calcula o grau de similaridade entre estes sinais, sendo esta técnica muito vantajosa, pois é facilmente implementada em hardware (ARDO; AGSTROM, 2011).

Existem diversas aplicações envolvendo as técnicas de correlação cruzada, tais como: sistemas de radar, detecção de sinais e realização de medidas diversas na indústria. Esta ferramenta se torna atrativa quando o ambiente é desfavorável e há necessidade de realizar medidas não intrusivas (GRANADO, 1994).

Tomando como exemplo, na prática, os sistemas de localização sonoro por meio do uso de microfones fazem uso desta ferramenta para determinar o atraso dos sinais entre os dois microfones, onde os resultados obtidos são:

- ❑ O sinal resultante possui o dobro do tamanho que os sinais apresentados na entrada;
- ❑ O atraso é determinado através do valor máximo do sinal resultante.

Se o sinal resultante obter o valor máximo exatamente no valor central, os sinais possuem tendências de serem coincidentes, pois possuem defasamento nulo. Se o valor máximo no sinal resultante se encontrar deslocado para um dos lados em relação ao valor central, indica que os sinais estão defasados entre si.

3.3 Redes Neurais Artificiais

As RNAs são modelos computacionais que possuem capacidade de adquirir e manter o conhecimento por meio de informações. Tais modelos podem ser definidos como um conjunto de unidades de processamento (neurônios), sendo estes interligados por um grande número de conexões ou *sinapses artificiais* (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

A operação de um neurônio artificial pode ser descrita por meio dos seguintes passos:

1. Um conjunto de valores (sinais) são apresentados na entrada do neurônio;
2. Cada entrada do neurônio é multiplicada por meio do seu respectivo peso sináptico;

3. Calcular a soma ponderada dos sinais de entrada para obter o potencial de ativação;
4. Limitar a saída do neurônio por meio da aplicação de uma função de ativação; e
5. Compilar a saída do neurônio a partir da função de ativação aplicada em relação ao seu potencial de ativação.

O modelo do neurônio artificial foi desenvolvido a partir do conhecimento do modelo do neurônio biológico (sistemas nervosos e o cérebro humano) mantendo suas principais características como paralelismo e alta conectividade. Este modelo foi proposto por McCulloch & Pitts em 1943, sendo o modelo de neurônio mais simplificado e utilizado nas diferentes arquiteturas das RNAs (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010). Segue a Figura 19 apresentando o neurônio biológico (a), e um modelo para o neurônio artificial (b).

Figura 19: Apresentação do neurônio biológico (a) e artificial (b).

Fonte: (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

O neurônio artificial, apresentado na Figura 19 (b), é caracterizado por meio dos diversos sinais de entrada $\{X_1, X_2, X_3, \dots, X_n\}$, conjunto de pesos sinápticos associados às entradas $\{W_1, W_2, \dots, W_n\}$ e o sinal de saída $\{y\}$. As expressões que seguem sintetizam o resultado produzido no modelo do neurônio artificial, como sendo:

$$u = \sum_{i=1}^n W_i \cdot X_i - \theta \quad (37)$$

$$y = g(u) \quad (38)$$

onde i é o número de entradas, W_i é o ganho(peso) associado à entrada i , θ é o limiar de ativação, X_i é a entrada e $g(\cdot)$ é a função de ativação do neurônio artificial.

A função de ativação $g(\cdot)$ do neurônio artificial tem o objetivo de limitar a amplitude da saída do neurônio dentro de um intervalo de valores finitos. Existem vários tipos de funções de ativação disponíveis para serem utilizadas em diversas aplicações, sendo apresentadas algumas das funções a seguir (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

3.3.1 Função de ativação

a. Função degrau

Esta função apresentará resultados com valores unitários positivos quando o potencial de ativação for maior ou igual a zero, mas se apresentar potencial de ativação menor que zero os valores serão nulos.

$$g(u) = \begin{cases} 1, & \text{se } u \geq 0 \\ 0, & \text{se } u < 0 \end{cases} \quad (39)$$

A Figura 20 ilustra a função degrau.

Figura 20: Função de ativação degrau.

Fonte: (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

b. Função sinal

Nesta função, quando o potencial de ativação for maior que zero, a mesma responderá com valores unitários positivos. Quando for zero, assumirá valor nulo, e para um potencial menor que zero, apresentará valores unitários negativos.

$$g(u) = \begin{cases} 1, & \text{se } u > 0 \\ 0, & \text{se } u = 0 \\ -1, & \text{se } u < 0 \end{cases} \quad (40)$$

A Figura 21 representa a função sinal.

c. Função logística

A função logística assumirá sempre valores reais como resultado na saída entre zero e um.

$$g(u) = \frac{1}{1 + e^{-\beta \cdot u}} \quad (41)$$

onde β é uma constante real associada ao nível de inclinação da função logística frente ao seu ponto de inflexão, conforme apresentado na Figura 22.

Figura 21: Função de ativação sinal.

Fonte: (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

Figura 22: Função de ativação logística.

Fonte: (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

d. Função hiperbólica

Esta função assumirá sempre valores reais entre -1 e 1 como resultado na saída.

$$g(u) = \frac{1 - e^{-\beta \cdot u}}{1 + e^{-\beta \cdot u}} \quad (42)$$

β também está associado ao nível de inclinação da função tangente hiperbólica em relação ao seu ponto de inflexão, podendo ser verificado na Figura 23.

Figura 23: Função de ativação hiperbólica.

Fonte: (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

3.3.2 Arquitetura da RNA

Uma RNA é definida por meio de sua arquitetura e topologia. A forma como os neurônios estão dispostos uns em relação aos outros definem a arquitetura da RNA. Já a topologia reflete as diferentes formas de composições estruturais que uma RNA pode assumir para uma mesma arquitetura (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010). Desta forma, a arquitetura de uma RNA é basicamente formada por:

- a. Camada de entrada;
- b. Camada(s) intermediária(s); e
- c. Camada de saída.

Conforme descrito em (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010), as principais arquiteturas das RNAs podem ser classificadas como: redes *feedforward* de camada simples, redes *feedforward* de camadas múltiplas, redes recorrentes e redes reticuladas. Neste sentido, segue um breve descritivo sobre as arquiteturas apontadas.

3.3.2.1 Rede *feedforward* camada simples

Esta arquitetura de rede possui uma camada de entrada e uma única camada de neurônios, sendo esta também sua camada de saída, conforme apresentada na Figura 24. O fluxo de informações neste tipo de rede é unidirecional, sendo da camada de entrada em direção à camada de saída.

Figura 24: Rede *feedforward* de camada simples.

Fonte: (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

Este tipo de rede geralmente é aplicada em problemas que envolvem a classificação de padrões e filtragem linear.

3.3.2.2 Rede *feedforward* de camadas múltiplas

Conforme apresentada na Figura 25, neste tipo de arquitetura a rede possui múltiplas camadas sendo formada com uma camada de entrada de n sinais, duas camadas neurais

escondidas com n_1 e n_2 neurônios, e uma camada neural de saída contendo m neurônios, que representam os valores de saída.

Figura 25: Rede *feedforward* de camadas múltiplas.

Fonte: (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

Esta arquitetura de rede geralmente é utilizada em diversos tipos de problemas, tais como: aproximação de funções, classificação de padrões, identificação de sistemas, otimização, robótica, etc.

3.3.2.3 Rede recorrente

Este tipo de rede possui um processamento dinâmico das informações, podendo ser utilizada em sistemas variantes em relação ao tempo, tais como: previsão de séries temporais, controle de processos, etc. Nesta arquitetura de rede os neurônios da camada neural de saída realimentam os neurônios na camada de entrada.

Somente para ilustrar, a Figura 26 apresenta a camada intermediária sendo realimentada por um dos sinais da camada de saída.

Devido ao processo de realimentação, as saídas atuais levam em consideração os valores das saídas anteriores.

3.3.2.4 Rede reticulada

Neste tipo de arquitetura de rede, o principal propósito é a extração de características, tendo suas aplicações em problemas de agrupamento, reconhecimento de padrões, otimização de sistemas, etc. A Figura 27 ilustra uma rede reticulada.

3.3.3 Processo de treinamento e aprendizado

O algoritmo de aprendizagem de uma RNA consiste no seu processo de treinamento, sendo este executado por meio de passos ordenados, os quais são necessários para a sin-

Figura 26: Rede recorrente.

Fonte: (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

Figura 27: Rede reticulada.

Fonte: (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

tonização dos pesos sinápticos e limiares de seus neurônios.

O objetivo deste processo é a generalização de soluções que são produzidas em suas saídas. Nesta etapa o conjunto total das amostras é dividido no subconjunto de treinamento e teste, sendo que o subconjunto de treinamento é composto aleatoriamente com cerca de 60 a 90 % das amostras do conjunto total, sendo este utilizado no processo de aprendizado da rede. Os pesos sinápticos e limiares dos neurônios são ajustados a cada apresentação completa das amostras na etapa de treinamento, sendo esta denominada *época de treinamento*. O subconjunto de teste é composto por 10 a 40 % do conjunto total de amostras, pelo qual será verificado se os aspectos da generalização de soluções da rede encontram-se em níveis aceitáveis, obtendo-se desta forma a validação da topologia utilizada.

O tipo de treinamento pode ser supervisionado e não supervisionado (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010).

O processo supervisionado é composto por um conjunto de amostras (padrões), sendo que para cada amostra dos sinais de entrada, associam-se amostra(s) conhecida(s) na(s) saída(s). Desta forma, os valores de saída são utilizados para ajustar continuamente os pesos sinápticos e limiares até que a RNA produza respostas aceitáveis em função do conjunto de amostra na entrada. No caso do processo não supervisionado, mesmo conhecendo o conjunto de amostra na entrada, não há a associação correspondente com a amostra da saída. Sendo assim, a RNA deverá se auto-organizar por meio do agrupamento do conjunto de treinamento em subconjuntos (*clusters*), baseado no conceito de similaridade (BARBOSA, 2010).

3.4 Considerações Parciais

Neste capítulo foi apresentada a teoria sobre as ferramentas matemáticas TW, PE e das RNAs, descrevendo-se suas principais propriedades e princípios de aplicação.

Vale acrescentar que, neste trabalho, a ferramenta matemática TW foi utilizada para a detecção dos eventos dispondo da TWD, sendo que o início de um segmento de transição será determinado por meio do valor máximo contido no primeiro nível de detalhe da decomposição multiresolução referente à janela analisada dos sinais de tensão para cada fase. Com a aplicação desta ferramenta visa-se obter o máximo desempenho na detecção dos eventos.

Já a ferramenta estocástica foi utilizada neste trabalho para representar um sinal estacionário. Sendo assim, por meio da aplicação da FDP e da CC, tornou-se possível a classificação dos eventos detectados e analisados de forma não intrusiva, sendo este um dos indicadores para os MITs.

A aplicação de um sistema inteligente como é o caso das RNAs, proporcionou à estimação do torque eletromagnético e velocidade dos motores, por meio da apresentação das tensões e correntes de cada fase em suas entradas.

Na sequência, apresenta-se o capítulo 4. Neste, além da metodologia proposta para o diagnóstico e análise da influência dos distúrbios nos MITs, serão também apresentados os tipos de monitoramento de QEE existentes atualmente e os IEDs associados aos MITs.

Metodologia Proposta

Neste capítulo serão apresentadas informações relacionadas ao monitoramento da Qualidade da Energia Elétrica (QEE) e dos *Intelligent Electronic Devices* (IEDs) usualmente empregados, bem como da metodologia proposta nesta tese para o diagnóstico e análise da influência dos afundamentos e interrupções de tensão nos MITs.

Conforme anteriormente já colocado, a metodologia proposta terá como função detectar, analisar, classificar e estimar de forma não intrusiva eventos que venham a prejudicar a operação esperada dos motores de indução trifásicos.

Desta forma, pelo emprego da Transformada *Wavelet* (TW), Função Densidade de Probabilidade (FDP), Correlação Cruzada (CC) e Redes Neurais Artificiais (RNAs), serão apontados os indicadores para os MITs que refletirão o estado do sistema por meio da aquisição dos sinais das tensões e correntes trifásicas nos barramentos do SEI, podendo informar a condição enfrentada ao supervisor do sistema, onde esta informação poderá servir de alerta no caso de uma condição danosa para o MIT.

4.1 Monitoramento da QEE

A busca pela eficiência dos processos nos diversos setores de energia, principalmente no ramo industrial, tem levado à automatização dos setores pelo emprego de equipamentos modernos, os quais muitas vezes são sensíveis às variações da tensão fornecida. Neste sentido, tem-se a necessidade de um monitoramento remoto contínuo dos sinais de tensão e corrente, bem como de outras grandezas que sejam pertinentes aos problemas manifestados.

Portanto, a qualidade da energia tornou-se um fator de grande importância, ressaltando e justificando a necessidade de um monitoramento dispondo, por exemplo, da ação combinada de multimedidores de qualidade da energia e de *Intelligent Electronic Device*, sendo esta composição resultante uma ferramenta poderosa para a análise de distúrbios no SEI como um todo.

Conforme apresentado por (BERNARDES; AYELLO, 2008), a representação de uma arquitetura combinada e básica para a aplicação destes equipamentos, a partir do Barramento de Alta Tensão (BAT) e do Barramento de Média Tensão (BMT), pode ser ilustrada por meio da Figura 28.

Figura 28: Arquitetura básica combinando multimedidores e IED aplicados à proteção.

Fonte: Adaptado de (BERNARDES; AYELLO, 2008).

Cabe adiantar que este conceito de monitoramento dispondo da ação combinada, poderá vir a subsidiar, por exemplo, a indústria, ao tomar as decisões na redução dos custos das perdas e na otimização dos processos como um todo.

4.1.1 Analisador de Qualidade da Energia Elétrica

Para o monitoramento da QEE, aplica-se a filosofia de utilizar analisadores, medidores, ou multimedidores na aquisição e armazenamento dos dados através de vários equipamentos distribuídos ao longo do SEP (BERNARDES; AYELLO, 2008). Desta forma, a Figura 29 ilustra as possibilidades de alocação de vários analisadores distribuídos em um sistema elétrico qualquer entre a concessionária e os consumidores finais.

Conforme encontrado em Moreno-Munoz (2007), a Figura 30 ilustra os blocos internos e constituintes da maioria dos equipamentos voltados às medições de QEE. Neste contexto, segue um breve descritivo sobre os blocos básicos de um medidor de QEE.

A aquisição dos dados é realizada através do condicionamento dos sinais provenientes dos transdutores de potencial (tensão) (Transformador de Potencial (TP)) e corrente (Transformador de Corrente (TC)), sendo este condicionamento realizado através da filtragem (quando desejável), da digitalização e da normalização do sinal. Os sinais são filtrados através de filtros passa baixa, com frequência de corte igual à metade da taxa

Figura 29: Topologia para a alocação dos analisadores de QEE em um SEP qualquer.

Fonte: Adaptado de (KRON, 2011).

Figura 30: Diagrama de blocos básicos de um medidor de QEE.

Fonte: Adaptado de (MORENO-MUNOZ, 2007).

amostral desejada, para que não ocorra o efeito *aliasing*. Após a filtragem, inicia-se o processo de digitalização dos sinais por meio da utilização de um Conversor A/D. O bloco de Processamento Digital de Sinais (PDS) processa os dados digitais convertidos e executa os algoritmos para o gerenciamento e armazenamento dos dados, onde, posteriormente, estes dados armazenados poderão ser disponibilizados via um módulo de comunicação e analisados remotamente, para que seja emitido um relatório referente ao monitoramento

de QEE (MORENO-MUNOZ, 2007).

Vale ressaltar que após consulta às especificações técnicas de alguns fabricantes (DRANETZ, 2003; IMS, 2015; KRON, 2011; FLUKE, 2012), conforme demonstrado na Tabela 2, verifica-se que atualmente, os analisadores comerciais voltados à QEE possuem uma taxa de amostragem típica (mínima) de 256 amostras/ciclo (para uma frequência fundamental de 60 Hz) e um Conversor A/D de 12 bits.

Tabela 2: Características básicas dos analisadores comerciais.

Fabricante	Taxa amostragem/ciclo	Conversor A/D	Modelo
Dranetz	256	16 bits	PowerXplorer PX5
IMS	256	16 bits	PQ-600
Kron	256	12 bits	ELSPEC G4410
Fluke	416	16 bits	434-II/435-II/437-II

Ressalta-se também que os analisadores comerciais executam suas medições em conformidade com a norma IEC 61000-4-30, utilizando janelas de um ciclo contendo valores discretizados, sendo as janelas atualizadas a cada meio ciclo (IEC, 2003). Tais equipamentos apresentam uma janela deslizante de 256 amostras (1 ciclo do sinal), sendo atualizada a cada 8 ms. Possuem também sofisticados recursos para a detecção de eventos e alta capacidade de processamento/memória (PEREIRA; KAGAN, 2009).

Vale comentar que os analisadores de QEE possuem uma arquitetura (*hardware*) muito similar ao relé de proteção digital, sendo que a diferença básica está no tipo de algoritmo utilizado (*software*) para cada aplicação, e na sua capacidade de gerenciamento e armazenamento da informação (LISOWIEC; NOWAKOWSKI; KOLODZIEJCZYK, 2008).

4.1.2 *Intelligent Electronic Device*

Como fato, tem-se que o avanço tecnológico proporcionou a utilização de equipamentos digitais microprocessados no SEI. Desta maneira, o relé de proteção digital adquiriu diversas funcionalidades e recursos, ou seja, além de efetuar a proteção do sistema e/ou equipamento, também é considerado um IED devido às funções de monitoramento e medições, controle e automação, comunicação de dados e operação dos processos, dentre outras (BERNARDES; ROCHA, 2009).

Conforme apresentado na Figura 31, o IED, além de disponibilizar as funções de proteção para os equipamentos, também oferece recursos de monitoramento e controle devido ao aumento na capacidade de medição.

Figura 31: Funcionalidades do IED para a proteção.

Fonte: Adaptado de (BERNARDES; ROCHA, 2009).

Desta forma, o IED, por meio das medições e monitoramento das grandezas, agrega funções indiretamente relacionadas à QEE como, a emissão de relatórios referentes ao MIT, incluindo a capacidade térmica, perfil de carga, tensão média e recursos oscilográficos, permitindo, por exemplo, associar um sobreaquecimento no motor com a ocorrência de desequilíbrios de tensão, ou elevados níveis de distorção harmônica, caso estes indicadores estejam acima de limites pré-definidos (BERNARDES; ROCHA, 2009).

O IED permite medir e calcular as principais grandezas, como, tensão, corrente, potência, desequilíbrio de tensão, distorção harmônica total e escorregamento. Já para medir as grandezas referentes à capacidade térmica no estator e rotor, resistência rotórica e temperatura do estator e mancal, utiliza-se o módulo *Resistive Temperature Device* (RTD), conforme ilustra a Figura 32 de um diagrama de interligação de um IED aplicado na proteção de MITs (BULGARELLI, 2006).

Através da apresentação do diagrama de blocos de um IED para a proteção de motores, conforme ilustra a Figura 33, coloca-se um breve descritivo sobre os blocos constituintes de um relé de proteção digital.

Os sinais de entrada de corrente e de tensão são condicionados através dos TPs e TCs. Os sinais analógicos isolados são filtrados através de filtros passa baixa, utilizando-se de filtros analógicos, de forma a minimizar o efeito da sobreposição de espectros (efeito *aliasing*) produzido por frequências acima da metade da frequência de amostragem, de acordo com o critério de *Nyquist*. Após a filtragem analógica, os sinais são então amostrados e convertidos em dados digitais por meio de Conversores A/D, que possuem resolução de 16 bits, adequados à faixa dinâmica de correntes normalmente existentes em SEP (BUL-

Figura 32: Diagrama de interligação de um IED para proteção do MIT.

Fonte: (BULGARELLI, 2006).

Figura 33: Diagrama de blocos de um relé de proteção digital.

Fonte: (BULGARELLI, 2006).

GARELLI, 2006).

O PDS processa os dados digitais convertidos e executa os algoritmos de proteção existentes, carregados em memórias do tipo *FLASH*. Os dados intermediários, gerados

durante os cálculos, são armazenados em memórias do tipo *Synchronous Dynamic Random Access Memory* (SDRAM). Uma amostragem típica entre 16 e 128 amostras/ciclo (para a frequência fundamental de 60 Hz) é normalmente utilizada nos relés de proteção digital de motores. Esta frequência de amostragem permite medições adequadamente precisas de valores eficazes (*Root Mean Square* (RMS)) dos sinais contendo, por exemplo, componentes harmônicas, tornam os filtros *anti-aliasing* simples e com custos reduzidos, e permite a função de oscilografia capturar sinais com frequências suficientemente elevadas durante os eventos de faltas (curtos-circuitos) para a sua adequada análise (BULGARELLI, 2006).

Vale ressaltar que após consulta às especificações técnicas de alguns fabricantes (SIEMENS, 2012; EATON, 2009; MULTILIN, 2011; ABB, 2011; SEG, 2008), conforme demonstrado na Tabela 3, verifica-se que atualmente os relés comerciais possuem um tempo diversificado de respostas para a proteção frente aos curtos-circuitos instantâneos passíveis de ocorrência em um SEI.

Tabela 3: Características básicas dos relés comerciais.

Fabricante	Tempo de resposta (instantâneo)	Modelo
Siemens	16 ms	SIPROTEC7SK80
Eaton	20 ms	MP3000
GE	20 à 45 ms	239
ABB	50 ms	REM610
SEG	40 ms	MRM3-2E

Será apresentado no próximo tópico o Sistema Elétrico Industrial (SEI) utilizado para testar e validar os indicadores obtidos por meio da metodologia proposta.

4.2 Sistema Elétrico Industrial Utilizado

Nesta seção será apresentado o Sistema Elétrico Industrial (SEI) utilizado nessa pesquisa para a realização dos testes e validação da metodologia proposta na definição dos indicadores para os MITs. Vale destacar que este SEI em análise inclui uma parametrização completa e em detalhes do MIT em observação, respeitando ao máximo os dados reais obtidos em campo.

4.2.1 *Software DIGSILENT PowerFactory*

O *software DIGSILENT PowerFactory* foi desenvolvido pela empresa DIGSILENT (**DI**gital **SI**muLation and **E**lectrical **NeT**work). O *software* é uma das poderosas ferramentas computacionais encontradas e amplamente difundidas para a análise de SEPs.

O *software DIGSILENT PowerFactory* foi projetado e desenvolvido por programadores e engenheiros qualificados com muitos anos de experiência nos campos da programação e análises de SEPs, sendo sua confiabilidade garantida por meio dos resultados obtidos devido ao grande número de implementações deste *software* no planejamento e operação dos sistemas de potência.

Apenas para efeito de ilustração, seguem algumas de suas principais possibilidades de utilização para (DIGSILENT, 2010):

- ❑ Cálculo do fluxo de carga e análise de curtos-circuitos;
- ❑ Análise e otimização de redes em baixa tensão;
- ❑ Simulação dinâmica e transitória;
- ❑ Análise da proteção, harmônica e estabilidade de tensão; e
- ❑ Análise modal, dentre outras.

Cabe esclarecer que nesta pesquisa foi utilizada uma licença acadêmica do *DIGSILENT PowerFactory*, a qual permite simular sistemas com no máximo 50 nós, sendo estes suficientes para modelar o SEI e obter as curvas das tensões e correntes trifásicas, potências, torque eletromagnético e velocidade no MIT analisado.

4.2.2 Sistema Elétrico Industrial

Para gerar os casos de Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs) necessários para análise do algoritmo proposto, modelou-se um SEI e o MIT com dados reais disponibilizados por uma indústria regional. O SEI em análise inclui uma parametrização completa e em detalhes do MIT em observação, respeitando os dados reais obtidos em campo.

Cabe colocar que o MIT (rotor tipo gaiola de esquilo) foi avaliado através das simulações em vazio (regime permanente senoidal) e em carga, sob curtos-circuitos caracterizados em diferentes pontos do SEI. Destas simulações, foi possível a obtenção dos gráficos da resposta dinâmica do motor, pelo qual se verificará o comportamento do mesmo frente ao sistema.

Figura 34: Diagrama representando o SEI modelado.

A Figura 34 traz uma representação do SEI utilizado para caracterizar as simulações do MIT, bem como as situações de faltas aplicadas para avaliar as respostas dinâmicas.

O sistema elétrico é composto por:

- ❑ Uma subestação de energia de 138,0 kV;
- ❑ Dois transformadores abaixadores de potência (T1 e T2) com relações 138,0 kV/11,95 kV e potência aparente de 12,5 MVA;
- ❑ Um transformador abaixador de potência (TM) com relações 11,95 kV/4,16 kV e potência aparente de 1,5 MVA;
- ❑ Um transformador abaixador de potência (T3) com relações 11,95 kV/0,22 kV e potência aparente de 0,045 MVA;
- ❑ Cargas caracterizadas por um fator de potência unitário e potência ativa de 0,04 MW (Carga 3) e 10 MW por carga (Carga 1 e 2); e
- ❑ Motor de indução trifásico de 4,16 kV na potência de 600 kW (M1).

4.2.2.1 Subestação de Energia

O SEI tem a importante função de fornecer energia elétrica com qualidade adequada ao consumidor no instante em que esta for solicitada. Sendo assim, para garantir a integridade neste sistema, adotou-se a parametrização de uma subestação de energia em tensão de sub transmissão de 138,0 kV, baseado nos níveis de curto-circuito no barramento

de entrada B1/BAT. Pelo emprego do *software DIgSILENT PowerFactory*, o modelo de rede externa foi utilizado, sendo os parâmetros necessários à sua modelagem apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros de entrada para modelar a subestação de energia.

Potência de curto circuito (Sk máx)	1.474,772 (MVA)
Corrente de curto circuito (Ik máx)	6,17 (kA)
Razão (X/R máx)	3,40
X0/X1	3,323156
R0/X0	0,255918

4.2.2.2 Transformadores Abaixadores de Potência

O comportamento dos transformadores foram representados através da modelagem do transformador a dois enrolamentos, disponibilizado na biblioteca do *software DIgSILENT PowerFactory*. Os principais dados utilizados para a modelagem dos dois transformadores abaixadores são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros utilizados para modelar os transformadores de potência abaixadores T1 e T2.

Potência nominal	Frequência nominal	Tensão do primário
10 (MVA)	60 (Hz)	138 (kV)
Tensão do secundário	Conexão	Deslocamento de fase
11,95 (kV)	Dyn1	30 (graus)
Impedância	Impedância	Perdas
de sequência positiva	de sequência zero	no cobre
9,78 (%)	8,313 (%)	60,32322 (kW)

O modelo dos transformadores *T1* e *T2* (Figura 34) foram validados através da comparação dos resultados simulados dos níveis de curto-circuito no barramento B2/BMT, com os valores fornecidos por uma indústria regional nas situações do disjuntor de in-

terligação aberto, quando os transformadores operam de forma independente, e fechado, quando os mesmos operam em paralelo, conforme ilustram as Tabelas 6 e 7.

Tabela 6: Valores dos níveis de curto-circuito trifásico no barramento B2/BMT com o disjuntor de interligação aberto para os transformadores T1 e T2.

Barramento	Especificado	Calculado	Especificado	Calculado
	(A)	(A)	(X/R)	(X/R)
11,95kV	4.646	4.627	13,4	13,1

Tabela 7: Valores dos níveis de curto-circuito trifásico no barramento B2/BMT com o disjuntor de interligação fechado para os transformadores T1 e T2.

Barramento	Especificado	Calculado	Especificado	Calculado
	(A)	(A)	(X/R)	(X/R)
11,95kV	8.737	8.700	11,4	11,22

4.2.2.3 Cargas Conectadas no SEI

A simulação das cargas 1 e 2 conectadas no barramento B2/BMT e da carga 3 conectada no barramento B4/BBT compreende a modelagem do módulo de carga geral disponível via o *software DIgSILENT PowerFactory*. Para a modelagem foi considerada a potência ativa fornecida como parâmetro de entrada. Segue a Tabela 8 apresentando os valores inseridos e considerados para o módulo das cargas.

Tabela 8: Parâmetros de entrada de cada carga para o módulo das cargas.

Potência ativa	Tipo de carga	Fator de potência	Tensão	Carga
10 (MW)	Balanceada	1,00 (pu)	1,00 (pu)	Cargas 1 e 2
0,04 (MW)	Balanceada	1,00 (pu)	1,00 (pu)	Carga 3

4.2.2.4 Motor de Indução Trifásico

Um aspecto importante a ser salientado é que a variação da corrente, decorrente de situações (operações) que caracterizam frequências diferentes da frequência fundamental, pode refletir na diminuição da vida útil do motor e comprometer o seu isolamento.

A modelagem do MIT foi realizada dispondo do módulo de máquina assíncrona do *software DIgSILENT PowerFactory*, pelo qual diversos parâmetros elétricos e mecânicos foram empregados.

Vale frisar que os dados inseridos no modelo foram obtidos através de ensaios obtidos do fabricante do motor que se encontra em campo.

Os parâmetros de entrada referente ao Motor 1 estão ilustrados pelas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9: Parâmetros de entrada do Motor 1.

	Parâmetros	Parâmetros
	Simulado	Fabricante
Tensão nominal	4,16 (kV)	4,16 (kV)
Potência nominal	597 (kW)	597 (kW)
Fator de potência	0,92	0,88
Eficiência	94,0 (%)	94,1 (%)
Frequência nominal	60 (Hz)	60 (Hz)
Rotação	3.565 (rpm)	3.570 (rpm)
Pares de pólos	1	1
Conexão	Y	Y

Além da modelagem do MIT, foi adicionado também o ajuste da carga associada ao motor, uma vez que o conhecimento da característica da carga imposta ao eixo da máquina é de suma importância para a análise de desempenho. As características consideradas estão expressas na Tabela 10.

Foram apresentados em detalhes os elementos constituintes do SEI modelado. A modelagem dos elementos permitirá uma melhor caracterização e a análise das condições operativas do MIT, bem como uma análise da sua resposta dinâmica frente a alguns dos distúrbios associados à QEE e de interesse para o contexto desta pesquisa.

Cabe recomendar a leitura do **Apêndice A** deste documento onde são apresentados os resultados das simulações sobre o SEI em análise, bem como saídas gráficas que procurem validar o modelo do MIT através da simulação em vazio durante a partida, com carga, e em regime permanente senoidal.

Tabela 10: Parâmetros do torque eletromagnético do Motor 1.

	Parâmetros
	Simulado
Corrente de rotor travado	5,70 (p.u.)
Torque de rotor travado	0,92 (p.u.)
Torque de partida	2,03 (p.u.)
Resistência do estator	0,14 (p.u.)
Reatância do estator	0,01 (p.u.)
Reatância de magnetização	2,48 (p.u.)
Resistência do rotor	0,01 (p.u.)
Reatância do rotor	0,10 (p.u.)
Tipo de rotor	Dupla gaiola

4.3 Estrutura da metodologia proposta

Nesta seção, será apresentada a metodologia proposta para o diagnóstico e análise da influência dos afundamentos e interrupções de tensão nos motores de indução trifásicos de grande porte.

A metodologia proposta tem como função aquistar os sinais das tensões e correntes trifásicas nos barramentos do SEI, detectar e classificar o distúrbio observado no sistema, e fazer a estimação de forma não intrusiva do torque eletromagnético e da velocidade associada aos MITs em análise.

A Figura 35 apresenta o fluxograma simplificado da metodologia proposta.

Sendo assim, a sua apresentação será feita em três módulos:

- ❑ Módulo de Pré-processamento;
- ❑ Módulo de Detecção; e
- ❑ Módulo de QEE.

Figura 35: Fluxograma para a metodologia proposta.

Fonte: Próprio autor.

4.3.1 Módulo de Pré-processamento

Este módulo objetiva simular as diversas etapas comuns que os dados de entrada passam em um analisador e/ou multimedidor comercial (convencional), evidenciando a utilização de filtros *anti-aliasing*, a amostragem simultânea das tensões e correntes trifásicas, e o processo de digitalização através do Conversor A/D.

4.3.1.1 Aquisição de dados

A aquisição dos sinais de entrada de corrente e de tensão trifásicos são condicionados por TPs e TCs. Cabe afirmar que neste trabalho, os TPs e TCs não estão sendo considerados e os sinais de tensão e corrente trifásicos foram obtidos por meio de simulações computacionais com uma alta taxa de amostragem (1 MHz) de modo a representar fielmente os sinais analógicos observados na rede elétrica. Posteriormente, estes sinais foram re-amostrados para uma frequência de 15.360 Hz.

Vale ressaltar que os arquivos de dados provenientes das simulações foram gerados no formato ".DAT", onde estes arquivos contêm valores numéricos para cada sinal de entrada (tensões e correntes trifásicas), sendo separados por linhas e colunas.

O formato do arquivo de dados segue o seguinte conteúdo:

- Primeira coluna contém o tempo da amostra (μs);

- Segunda e demais colunas contêm os valores das amostras das tensões e correntes trifásicas nos barramentos do SEI em análise.

A Figura 36 apresenta um diagrama indicando o fluxo da informação na etapa da aquisição dos dados.

Figura 36: Diagrama para o fluxo da informação na fase de aquisição dos dados.

Fonte: Próprio autor.

A seguir será explanado o funcionamento de cada uma das etapas supracitadas.

4.3.1.2 Filtro *Anti-Aliasing*

Cabe firmar que nesta pesquisa, não está sendo considerado o filtro *anti-aliasing* para a filtragem dos sinais em análise. Pretende-se em trabalhos futuros analisar fenômenos dependentes da frequência e o uso de tal filtro poderá interferir na análise desejada.

4.3.1.3 Conversor Analógico Digital

A maioria dos sinais de interesse são de natureza analógica e contínuos no tempo. Sendo assim, para executar qualquer processamento computacional com um sinal analógico, deve-se efetuar sua representação por meio de uma sequência de números discretizados. Cada número discreto representará um valor do sinal instantâneo, sendo este

denominado de sinal digital. O processo de digitalização do sinal compreende a amostragem e a quantização, sendo feito por meio de um Conversor A/D (SEDRA; SMITH, 2000).

A Figura 37 ilustra o processo de digitalização de um sinal analógico (SMITH, 1999).

Figura 37: Processo de digitalização de um sinal analógico.

Fonte: Adaptado de (SMITH, 1999).

Quanto maior o número de *bits* (n), mais o valor da palavra digital quantizada D se aproximará do valor da amostra analógica (SEDRA; SMITH, 2000).

Sendo assim, a equação 43 define a saída do Conversor A/D com n -bits como (MADISSETTI; WILLIAMS, 1998):

$$D = \frac{A_{\text{signal}}}{FS} = \frac{b_n}{2^n} + \frac{b_{n-1}}{2^{n-1}} + \dots + \frac{b_1}{2^1} \quad (43)$$

onde:

- A_{signal} é o sinal analógico;
- FS é o fundo de escala do sinal; e
- b_n é o valor digital 0 ou 1.

Ainda referente ao processo de digitalização, tem-se que um *Least Significant Bit* (LSB) é a largura da região quantizada, sendo que a linha da resposta ideal passa no centro de cada uma das regiões, conforme apresentada na Figura 38 (MADISSETTI; WILLIAMS, 1998).

Em um Conversor A/D a sua resolução é definida como a menor distinção de alteração que pode ser produzida por meio do sinal analógico no conversor, sendo representada por (MADISSETTI; WILLIAMS, 1998):

$$\Delta A_{\text{signal}} = \frac{FS}{2^n} \quad (44)$$

Na equação, ΔA_{signal} é o menor valor do sinal analógico reproduzível por um conversor com n -bits para um sinal com fundo de escala FS .

A quantidade dos níveis de quantização indica a quantidade de valores que cada amostra do sinal analógico pode assumir em cada instante de tempo, sendo que cada amostra será aproximada para o nível de quantização mais próximo do seu valor original. Desta

Figura 38: Características da transferência ideal para um Conversor A/D de 3 bits.

Fonte: Adaptado de (MADISETTI; WILLIAMS, 1998).

forma, este processo insere um erro na representação digitalizada do sinal, onde o erro para um conversor ideal deve ser no máximo, igual à metade de um nível de quantização (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI, 1999). Na medida em que se aumenta o número de *bits*, o erro de quantização diminui, fazendo com que a escolha correta deste parâmetro seja de grande importância para uma melhor representação do sinal a ser digitalizado (MADISETTI; WILLIAMS, 1998).

Neste trabalho, a fim de manter a compatibilidade mínima conforme as especificações dos analisadores comerciais descritos na Tabela 2, adotou-se para o processo de digitalização um Conversor A/D de 12 bits, com uma frequência de amostragem de 15.360 Hz. Desta forma, as definições tomadas permitem uma melhor caracterização dos sinais de entrada e assim proporcionam uma melhor resposta para a criação dos indicadores.

4.3.1.4 Janelamento dos sinais

Como a aquisição dos dados é de forma contínua, realiza-se o janelamento dos sinais de tensão e corrente para cada fase, através de um deslizamento no tempo da janela de dados sobre os sinais em análise. Neste trabalho, adotou-se uma janela deslizante que compreende 256 amostras/ciclo, com um passo de atualização de 1/16 de ciclo, sendo aproximadamente de 1 ms. A Figura 39 ilustra o deslocamento da janela a cada 1 ms.

4.3.1.5 Sinais digitalizados

Através dos sinais de tensão e corrente trifásicos, obtêm-se os sinais digitalizados e re-amostrados para 256 amostras por ciclo, tomando como base a frequência fundamental de 60 Hz. Estes sinais serão aplicados e considerados nos módulos subsequentes.

Figura 39: Janela deslizante durante a aquisição dos dados.

Fonte: Próprio autor.

4.3.2 Módulo de Detecção

Neste módulo, tomando como referência a Figura 35, realiza-se a detecção e a localização no tempo das alterações nas formas de ondas observadas nos sinais das tensões trifásicas (valores instantâneos). O algoritmo de detecção desenvolvido determina, em um pequeno intervalo de tempo, se a janela do sinal em observação pertence a um segmento de evento, ou a um segmento de transição. Neste sentido, a transição poderá ser caracterizada por mudanças rápidas e abruptas no sinal e, geralmente, o evento será delimitado e caracterizado por dois segmentos de transição, caracterizando-se por um comportamento estacionário do sinal (BOLLEN; GU, 2006), conforme exemplo demonstrado pela Figura 40.

Neste trabalho, tem-se interesse em efetuar a detecção do início do segmento de transição, onde as respostas observadas na análise da janela de dados contendo os transitórios dos sinais das tensões e correntes são importantes para a operação dos MITs. Sendo assim, para detectar o início de um segmento de transição com maior precisão possível, adotou-se uma janela deslizante que compreende 256 amostras/ciclo, com um passo de atualização de 1/16 de ciclo, de aproximadamente 1 ms para a detecção sobre os sinais de tensão para cada fase.

Conforme já apresentado no item 3.1.4, pode-se aplicar a TW para devidas análises no cenário de um SEI por meio da implementação de bancos de filtros, onde a TWD faz

Figura 40: Segmentação de um sinal de tensão trifásico.

Fonte: Adaptado de (BOLLEN; GU, 2006).

parte de um processo de filtragem digital no domínio do tempo. Quando o sinal é filtrado, o filtro passa baixas fornece a aproximação do sinal e o filtro passa altas fornece o detalhe do sinal original. A TWD não é única e depende destes dois filtros. Sendo assim, para trabalhar com esta ferramenta a escolha da *wavelet*-mãe a ser empregada no sinal se torna um parâmetro importante.

Desta forma, para prosseguir com o desenvolvimento deste trabalho utilizando esta ferramenta para a detecção dos eventos, testou-se diversas *wavelet*-mães, como: *Haar*, *Daubechies-4* (db4), *Daubechies-6* (db6), *Daubechies-8* (db8), *Daubechies-30* (db30), *Daubechies-76* (db76), *Coiflet-6* (coif6), *Coiflet-30* (coif30) e *Symlet-16* (sym16).

Após analisar suas respostas, decidiu-se utilizar o valor máximo contido no primeiro nível de detalhe da decomposição multiresolução referente a janela analisada, com aplicação da *wavelet*-mãe *Daubechies-4* (db4), pois esta possui o suporte mais compacto e sua variação abrupta de amplitude permite uma resposta melhor no domínio do tempo, identificando as discontinuidades características dos eventos passíveis de ocorrência sobre o SEI.

Neste sentido, a detecção do início do evento é feita por meio do valor máximo contido no primeiro nível de detalhe da janela analisada, onde, tomando como referência (USIDA et al., 2009; RODRIGUES, 2008), este valor é comparado com um limiar pré-estabelecido (*Limiar_início*), e caso haja extrapolação deste limiar, o algoritmo indica que nesta janela há alguma anormalidade (descontinuidade) no sinal em análise.

O passo seguinte determina qual é a amostra do sinal em análise que corresponde ao início do evento. Desta forma aplicam-se as equações 45 e 46, pelas quais, uma subtração de dois pares de amostras consecutivas é realizada.

$$Limiar_Descida1 = x(n + 2) - x(n + 1) \quad (45)$$

$$Limiar_Descida2 = x(n + 1) - x(n) \quad (46)$$

Se o resultado da subtração for superior aos limiares estabelecidos ($Limiar_Descida1$) e ($Limiar_Descida2$) é determinado o ponto que representa com exatidão o início do segmento de transição e a sua localização no tempo.

A Tabela 11 apresenta os limiares encontrados e considerados nesta pesquisa. Os mesmos foram tomados com base nos trabalhos de (USIDA et al., 2009; RODRIGUES, 2008), bem como na observação das situações simuladas para esta pesquisa.

Tabela 11: Limiares para a detecção.

$Limiar_início$	$Limiar_Descida1$	$Limiar_Descida2$
0,0039	0,00012	0,0008

Desta forma, para exemplificar os passos nesta etapa de detecção, a Figura 41 ilustra uma janela de dados deslizante contendo os coeficientes do primeiro nível de detalhe do sinal analisado para uma situação de defeito envolvendo a fase A com conexão a terra, ângulo de incidência do defeito igual a 33° , e resistência do defeito igual a zero ohm. Nesta situação de falta o valor para o instante inicial da descontinuidade é 0,200 segundos.

Figura 41: Coeficientes do primeiro nível de detalhe para o sinal em análise.

Fonte: Adaptado de (RODRIGUES, 2008).

Para cada janela deslizante analisada, é verificado se houve a extrapolação no valor do módulo de alguma amostra quando comparado com o limiar pré-estabelecido ($Limiar_início$). Quando da extrapolação superior a este limiar, é indicada a janela em

que ocorreu a anormalidade. De acordo com a ilustração, pode ser verificado que a partir do ponto 1 as amostras apresentam uma variação abrupta, onde o coeficiente do 1º nível de detalhe alcançou a amplitude de **0,1846**, ultrapassando o primeiro limiar pré-estabelecido.

O passo seguinte é determinar se a amostra do ponto 1 é referente ao *Limiar_início*, realizando-se uma subtração de dois pares de amostras consecutivas. Os cálculos executados para os limiares foram de $x(3) - x(2) = 0,0466$ e $x(2) - x(1) = 0,1380$, os quais apresentam resultados que ultrapassaram os limiares *Limiar_Descida1* e *Limiar_Descida2*. Desta forma, o ponto 1 representa com exatidão o início do segmento de transição, bem como a sua localização no tempo.

Após a detecção dos pontos de alteração (descontinuidades nos sinais), o algoritmo é direcionado para o próximo passo, que é o módulo de QEE responsável pela classificação dos eventos.

4.3.3 Módulo de QEE

Este módulo objetiva dispor da aplicação da Função Densidade de Probabilidade (FDP) e da Correlação Cruzada (CC), pelas quais busca-se uma execução rápida da classificação dos eventos detectados no módulo anterior. Também fará parte deste módulo, a estimação do torque eletromagnético e velocidade dos motores através das tensões e correntes obtidas no barramento do motor via a aplicação de Redes Neurais Artificiais (RNAs).

4.3.3.1 Classificação

Após efetuada a detecção por meio das alterações na forma de onda, o passo seguinte é a classificação dos eventos associados às Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs) no SEI em análise. Nesta etapa, serão utilizadas duas ferramentas estocásticas: a Função Densidade de Probabilidade (FDP) e a Correlação Cruzada (CC). Como resultado final desta etapa, tem-se a indicação do barramento de ocorrência do evento; das fases (a,b e c) envolvidas; e a classificação da ocorrência entre interrupções e afundamentos de tensão, conforme as definições estabelecidas pelo IEEE Standard 1159-1995 (IEEE, 1995). Desta forma a classificação de cada evento associado às VTCDs no SEI em análise segue conforme o fluxograma da Figura 42.

A seguir será apresentado e comentado o classificador desenvolvido aplicando a FDP e a CC.

4.3.3.2 A Classificação pela Função Densidade de Probabilidade

Após o evento ser detectado no Bloco 2 (Figura 42), passa-se à classificação dos eventos por meio da análise dos histogramas resultantes da aplicação da FDP nos sinais de tensão

Figura 42: Fluxograma do algoritmo para classificar o tipo de evento observado.

Fonte: Próprio autor.

medidos. Desta maneira, foi desenvolvido um algoritmo via *software* MATLAB que possibilitará analisar os valores das amplitudes máximas contidas nas barras do histograma

para cada fase da tensão em análise.

Cabe esclarecer que para ilustrar as etapas do classificador seguindo o fluxograma apresentado na Figura 42, será utilizado o sinal decorrente de uma situação de curto-circuito envolvendo a fase *A* com conexão a terra, ângulo de incidência do defeito igual a 33° e resistência do defeito de zero ohm.

- ❑ Bloco 3: Neste bloco o algoritmo obtém o histograma por meio dos valores da relação da frequência (número de ocorrências) versus a amplitude do sinal em análise no barramento de um específico MIT distribuídos em 50 barras (retângulos) para as três fases, simultaneamente, conforme ilustrado na Figura 43 que representa o histograma de uma fase referente à falta fase *A* com conexão a terra.
- ❑ Bloco 4: Nesta etapa, o algoritmo busca os valores de amplitude mínima e máxima contidos nas barras do histograma que possuem o maior número de ocorrências para as três fases, simultaneamente, conforme ilustrado pela Figura 43.

Figura 43: Gráfico do histograma para a relação da frequência versus a amplitude do sinal em análise.

Fonte: Próprio autor.

- ❑ Bloco 5: Após encontrados os valores de mínimo e de máximo, calcula-se o valor absoluto das amplitudes para as três fases, simultaneamente. A Tabela 12 apresenta os valores encontrados nas três fases referente a falta fase *A* com conexão a terra.

Tabela 12: Valores absolutos calculados para as três fases.

Fase A		Fase B		Fase C	
Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
0,003 (p.u.)	0,356 (p.u.)	0,993 (p.u.)	0,995 (p.u.)	0,876 (p.u.)	0,883 (p.u.)

- Bloco 6: Com os valores absolutos calculados, o algoritmo busca o menor valor do conjunto seguindo assim para a real classificação do evento, conforme demonstrado na Tabela 13.

Tabela 13: Menor valor obtido para cada fase analisada.

<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>
0,003 (p.u.)	0,993 (p.u.)	0,876 (p.u.)

Cabe afirmar que para esta pesquisa, efetuaram-se vários testes variando o ângulo de incidência do defeito. A Tabela 14 apresenta os menores valores obtidos para uma situação de defeito envolvendo a fase *A*, considerando os ângulos de incidência dos curtos-circuitos de 0°, 45° e 90°.

Tabela 14: Menor valor obtido para uma falta fase *A* - terra.

<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,009 (p.u.)	0,985 (p.u.)	0,877 (p.u.)	90°
0,004 (p.u.)	0,994 (p.u.)	0,876 (p.u.)	45°
0,000 (p.u.)	0,968 (p.u.)	0,842 (p.u.)	0°

Analisando a Tabela 14, verifica-se que os menores valores obtidos foram na Fase *A*. Desta forma, o limiar de classificação estabelecido para este tipo de falta compreenderá a faixa de **0,00** (p.u.) à **0,01** (p.u.).

Após o algoritmo buscar os menores valores obtidos entre as três fases analisadas, e conforme apresentado no Bloco 10, o classificador efetuará a classificação do distúrbio, a depender da resposta proveniente do cálculo da Correlação Cruzada (CC) pelos Blocos 7, 8 e 9.

A seguir será explanado o desenvolvimento da CC.

4.3.3.3 Correlação cruzada

Após o evento ser detectado pelo Bloco 2 referente à Figura 42, passa-se ao módulo da correlação cruzada que, em paralelo com a FDP, executa a classificação dos eventos por meio do cálculo da correlação cruzada das tensões trifásicas medidas no barramento do MIT em análise com relação às tensões trifásicas dos demais barramentos do SEI. Serão ilustradas as etapas referentes à correlação cruzada pelos Blocos 7, 8 e 9, seguindo

o fluxograma apresentado na Figura 42, e utilizando a mesma situação de curto-circuito anteriormente empregada, a qual retrata uma situação de defeito envolvendo a fase *A* com conexão a terra, ângulo de incidência do defeito igual a 33° e resistência do defeito de zero ohm.

Neste contexto, segue o descritivo passo a passo.

- ❑ Bloco 7: O algoritmo executa o cálculo da correlação cruzada entre a tensão de pós-falta medida no barramento do MIT em análise e os barramentos restantes do SEI para todas as fases (*Va*, *Vb* e *Vc*) simultaneamente, conforme demonstrado na Figura 44.

Figura 44: Correlação cruzada entre os sinais das tensões medidas no barramento do MIT e nos demais barramentos do SEI.

Fonte: Próprio autor.

- ❑ Bloco 8: Após correlacionar os sinais, calculam-se os valores absolutos das amplitudes para as três fases, simultaneamente. Este cálculo pode ser ilustrado pela Figura 44 por meio da variação dos valores de amplitude no gráfico da correlação cruzada dos sinais.
- ❑ Bloco 9: Com os valores absolutos calculados, o algoritmo busca o valor máximo obtido entre a correlação cruzada dos sinais para cada fase de tensão, simultaneamente, sendo este observado na Figura 44.

Os valores máximos obtidos para cada fase da tensão analisada, em função da situação de defeito envolvendo a fase *A* com conexão a terra, são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15: Valores máximos obtidos pela correlação cruzada por fase.

<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,000	0,400	0,428	33°

Cabe lembrar que a correlação cruzada sempre será executada correlacionando os sinais de tensão do barramento do MIT em análise com os sinais dos outros barramentos do SEI. A Tabela 16 apresenta os valores máximos obtidos via a correlação cruzada para uma situação de defeito envolvendo a fase *A* com conexão a terra, considerando os ângulos de incidência dos curtos-circuitos à 0°, 45° e 90°.

Tabela 16: Valores máximos obtidos via a correlação cruzada para uma falta fase *A* - terra.

<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,008	0,487	0,354	90°
0,004	0,392	0,430	45°
0,000	0,425	0,402	0°
0,00 - 0,01	0,39 - 0,49	0,35 - 0,43	Limiares da classificação

Desta forma, após a obtenção dos valores máximos para cada fase da tensão, considerando cada ângulo de incidência do defeito, foi possível determinar os limiares para a classificação por fase. Para o tipo de situação de falta anteriormente apresentado, os valores máximos obtidos e demonstrados na Tabela 16 foram: fase *A* com variação de **0,00** à **0,01**, fase *B* com variação de **0,39** à **0,49**, e fase *C* com variação de **0,35** à **0,43**.

- Bloco 10: Neste bloco o classificador recebe as informações dos Blocos 6 e 9, onde baseado nos limiares da classificação estabelecidos via FDP e CC efetuará a classificação final das ocorrências.

Quando da obtenção do menor valor da amplitude da tensão do Bloco 6 pela FDP, executa-se a comparação com os valores limites estabelecidos na Figura 45 (IEEE, 1995), classificando o distúrbio como uma interrupção, ou um afundamento de tensão.

Da informação do maior valor proveniente da CC do Bloco 9, executa-se a comparação com os valores limites estabelecidos para as três fases, simultaneamente, classificando quais são as fases e os barramentos do sistema envolvidos no distúrbio.

Figura 45: Faixa de valores em p.u. considerada para associar as ocorrências às VTCDs.

Fonte: (IEEE, 1995).

Como resultado para o exemplo apresentado da situação de defeito envolvendo a fase *A* com conexão a terra, ângulo de incidência do defeito igual a 33° e resistência do defeito de zero ohm, tem-se a resposta do classificador, conforme apresentado pela Tabela 17.

Tabela 17: Resposta do classificador para uma falta fase *A* - terra.

Tensão remanescente na fase <i>A</i>	0,003 (p.u.)
Tensão remanescente na fase <i>B</i>	0,993 (p.u.)
Tensão remanescente na fase <i>C</i>	0,876 (p.u.)
Tipo de Distúrbio	Interrupção de tensão
<i>Fases envolvidas</i>	Fase A - Terra
<i>Barramento envolvido</i>	BMTM

A partir da resposta obtida pelo classificador, é então enviado um sinal de alerta para o Bloco 11, e as informações referentes à Tabela 17 são enviadas para a visualização no Bloco 12.

Conforme apresentado na Figura 42, a partir da resposta indicada pelo módulo de classificação, o Bloco 11 recebe um sinal de alerta do Bloco 10 para que sejam ativadas as RNAs responsáveis pela estimativa do torque eletromagnético e da velocidade.

A seguir será explanada a metodologia utilizada para efetuar a estimativa do torque eletromagnético e a velocidade do MIT em análise.

4.3.3.4 Estimação do torque eletromagnético e da velocidade do MIT

Apenas para relembrar, vale comentar que estudos recentes apontam que o setor industrial é responsável por 40 % do consumo de energia elétrica no Brasil, sendo que o perfil das cargas nas indústrias é basicamente de motores elétricos, responsáveis pelo consumo de 62 % da energia elétrica (WANG; WANG, 2013).

Dada a importância destas máquinas, vale ressaltar que uma variação da corrente proveniente das variações de tensão diminui a vida útil dos motores e pode comprometer o seu isolamento. Portanto, é importante analisar os distúrbios ocorridos no SEI, para que se conheça a situação das máquinas durante e após os distúrbios evidenciados (GIBELLI; BRANCO; OLESKOVICZ, 2010). Seguindo este contexto, esta pesquisa também dispõe da aplicação de Redes Neurais Artificiais (RNAs) como aproximadores funcionais, para a estimação do torque eletromagnético e da velocidade do MIT em análise.

Com base na Figura 46, segue um breve descritivo de cada bloco que compõe esta aplicação via RNAs:

- ❑ Bloco 1: Registro de todas as tensões, correntes, torques eletromagnéticos e velocidades para cada tipo de falta aplicada no sistema via o *software DIgSILENT PowerFactory*;
- ❑ Bloco 2: Cálculo do valor médio das amostras consideradas como os sinais de entrada e saída;
- ❑ Bloco 3: Estimação via RNAs, após um adequado treinamento supervisionado, dos torques eletromagnéticos e das velocidades nos eixos dos motores para cada tipo de falta aplicada no SEI; e
- ❑ Bloco 4: Comparação dos sinais dos torques eletromagnéticos e velocidades estimadas com seus respectivos sinais simulados, gerando os sinais de erro que permitirão avaliar os desempenhos das funções propostas.

Em seguida, segue o desenvolvimento da estimação do torque eletromagnético e da velocidade.

Estimação do torque eletromagnético via RNAs

Nesta pesquisa, para o desenvolvimento da estimação do torque eletromagnético, cabe adiantar que foi escolhida uma RNA do tipo PMC, com duas camadas escondidas com a função de ativação logística, uma camada de saída com a função de ativação linear e o algoritmo de treinamento de *Levenberg-Marquardt* que funciona como aproximador funcional (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010). Esta topologia será a empregada individualmente para cada uma das dez possíveis situações de curtos-circuitos que serão comentadas na

Figura 46: Fluxograma Rede Neural Artificial.

Fonte: Próprio autor.

sequência.

Os detalhes desta aplicação serão apresentados na sequência.

❑ Fase de treinamento e teste para uma específica RNA

Para treinar uma RNA é preciso compilar um conjunto de padrões de entrada e saída com o objetivo de ajustar os pesos sinápticos. Este procedimento é conhecido como processo de treinamento. Deve-se assegurar na fase de treinamento que a RNA seja exposta a sequências de padrões que descrevam de forma adequada o comportamento do sistema (problema) em análise (GOEDTEL, 2007).

Os padrões de treinamento/teste para a estimação do torque eletromagnético do MIT foram gerados a partir de simulações computacionais executadas no *software DIgSILENT Power Factory*, possibilitando a obtenção das tensões, correntes e os torques eletromagnéticos para cada tipo de falta aplicada no SEI.

O conjunto de dados foi formado por 60 situações, constituído por 10 tipos de faltas, a saber: trifásicos; bifásicos sem (fase *AB*, fase *BC*, fase *CA*) e com o envolvimento da terra (fase *AB-Terra*, fase *BC-Terra*, fase *CA-Terra*); e monofásicos (fase *A-Terra*, fase *B-Terra* e fase *C-Terra*). As situações de curtos-circuitos simulados estão distribuídas conforme descrito na Tabela 18.

É importante enfatizar que será obtida uma RNA para cada uma das dez situações de curtos-circuitos anteriormente apresentadas.

Tabela 18: Divisão dos tipos de faltas por classes.

<i>Falta</i>	Quantidade	Ângulos de incidência	<i>Falta</i>	Quantidade	Ângulos de incidência
Trifásica	6	0° e 90°	BC	6	0° e 90°
AB - Terra	6	0° e 90°	CA	6	0° e 90°
BC - Terra	6	0° e 90°	A - Terra	6	0° e 90°
CA - Terra	6	0° e 90°	B - Terra	6	0° e 90°
AB	6	0° e 90°	C - Terra	6	0° e 90°
Resistência do defeito de zero ohm					

Para a criação do conjunto de dados foram executados os seguintes passos:

- . Cada classe de falta foi representada por seis distintas situações de faltas. Estas situações se referem a duas situações de faltas para cada uma das três barras do SEI modelado, com ângulo de incidência à 0° e à 90°;
- . O conjunto de dados tem como entrada as três tensões e as três correntes e, como saída, os respectivos torques eletromagnéticos; e
- . Cada padrão do conjunto de dados é então constituído por seis sinais, com 256 amostras cada, que serão apontadas como as entradas. Associada a cada amostra de entrada, existe também um valor a ser direcionado como saída, perfazendo também 256 amostras para cada um dos seis sinais considerados. Ao total, tem-se então 1.536 (6x256) amostras por situação de falta que foram empregadas para compor o conjunto de dados.

Ainda sobre o conjunto de dados formulado, foi executado um pré-processamento nos sinais de entrada das tensões e correntes, bem como da saída que representa o torque eletromagnético associado. Neste pré-processamento foi efetuado o cálculo do valor médio entre duas amostras, tanto para os sinais da entrada, como para os da saída. Com base no deslocamento de amostra-a-amostra sobre as 256 amostras pertinentes a cada situação, foi calculado o valor médio entre cada duas amostras.

Ressalta-se que o algoritmo de aprendizagem de uma RNA consiste no seu processo de treinamento, sendo executado por meio de passos ordenados necessários para o ajuste dos pesos sinápticos e limiares de seus neurônios. Nesta etapa, o conjunto total das amostras foi dividido no conjunto de treinamento e teste com separação aleatória, executando os conjuntos de treinamento/teste nas porcentagens de 70/30 %, 80/20 % e 90/10 %. Afirma-se que este último obteve os melhores resultados frente a generalização esperada. Portanto, o banco de dados contendo as 1.536 amostras

foi separado aleatoriamente, direcionando-se 1.383 amostras para o conjunto de treinamento da RNA, representando 90 %, e 153 amostras para a execução dos testes, representando 10 % do total das amostras. Vale frisar que este procedimento foi aplicado nas porcentagens 70/30 %, 80/20 % e 90/10 % de forma independente para cada um dos dez tipos de faltas considerados nesta pesquisa.

Com relação à escolha das topologias para as dez RNAs, algumas candidatas de redes *Perceptron Multi Camadas* (PMCs) foram apontadas inicialmente, sendo:

- Topologia candidata 1: com 10 neurônios na primeira camada escondida, 5 neurônios na segunda camada escondida;
- Topologia candidata 2: com 10 neurônios na primeira camada escondida, 10 neurônios na segunda camada escondida;
- Topologia candidata 3: com 20 neurônios na primeira camada escondida, 10 neurônios na segunda camada escondida;
- Topologia candidata 4: com 30 neurônios na primeira camada escondida, 10 neurônios na segunda camada escondida; e
- Topologia candidata 5: com 40 neurônios na primeira camada escondida, 20 neurônios na segunda camada escondida.

Após executar o treinamento e testes das topologias candidatas das redes PMCs, foi escolhida a topologia candidata 5. Vale afirmar que esta também será a topologia para as outras nove RNAs, e que todo o procedimento, como o adotado para esta situação de curto-circuito, foi comum às demais.

A Tabela 19 apresenta os parâmetros gerais da RNA escolhida para a estimação do torque eletromagnético.

Para ilustrar o desempenho desta topologia, tem-se na Figura 47, os resultados obtidos após a etapa de treinamento para uma situação de defeito envolvendo a fase A com conexão a terra.

A Tabela 20 apresenta os resultados obtidos para o *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), *Mean Square Error* (MSE) e o Desvio Padrão referentes aos testes gerais realizados dispondo desta topologia.

□ Fase de validação

Para verificar se as RNAs, para cada classe de falta considerada, aprenderam e generalizaram corretamente os dados apresentados na fase de treinamento e teste, criou-se um novo banco de dados contendo sinais com ângulos de incidência do

Tabela 19: Parâmetros das RNAs utilizadas.

Arquitetura da rede	Perceptron multicamadas
Tipo de treinamento	Supervisionado
Número de neurônios da primeira camada escondida	40
Número de neurônios da segunda camada escondida	20
Algoritmo de treinamento	Levenberg-Marquardt (<i>back-propagation</i>)
Épocas	1.000
Erro quadrático médio	$1e^{-5}$
Função de ativação das camadas escondidas	Logística
Função de ativação da camada de saída	Linear

Figura 47: Resposta da RNA para uma das situações de teste aplicadas para a estimação do torque eletromagnético.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 20: Resultados obtidos para os testes da RNA para a estimação do torque eletromagnético.

$MAPE$ (%)	MSE (p.u.)	Desvio Padrão (p.u.)
$3,58e^{-1}$	$2,70e^{-7}$	$5,22e^{-4}$

defeito diferentes dos dados já apresentados. As informações consideradas neste conjunto de validação seguem como os apresentados na Tabela 21. Vale comentar que o mesmo pré-processamento anteriormente realizado para o conjunto geral dos

dados (treinamento e teste), considerando a média entre duas amostras da entrada e/ou saída, também foi aplicado sobre este conjunto de validação.

Tabela 21: Divisão dos tipos de faltas por classes.

<i>Falta</i>	Quantidade	Ângulos de incidência	<i>Falta</i>	Quantidade	Ângulos de incidência
Trifásica	2	33° e 73°	BC - Terra	2	85° e 87°
AB	2	33° e 73°	CA - Terra	2	10° e 57°
BC	2	85° e 87°	A - Terra	2	33° e 73°
CA	2	10° e 57°	B - Terra	2	85° e 87°
AB - Terra	2	33° e 73°	C - Terra	1	57°
Resistência do defeito de zero ohm					

Segue a Figura 48 que ilustra os resultados obtidos pela RNA após o seu treinamento. Estes resultados são referentes a uma situação de defeito envolvendo a fase *A* com conexão a terra.

Figura 48: Resposta da RNA para a fase de validação na estimação do torque eletromagnético.

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 22 apresenta os resultados obtidos para o MAPE, MSE e o Desvio Padrão referente ao processo de validação.

Maiores detalhes e discussões mais aprofundadas dos resultados observados serão oportunamente apresentadas neste documento.

Tabela 22: Resultados obtidos para a fase de validação na estimação do torque eletromagnético.

<i>MAPE</i> (%)	<i>MSE</i> (p.u.)	Desvio Padrão (p.u.)
4,91	$2,13e^{-3}$	$4,32e^{-2}$

Estimação da velocidade via RNA

Assim como para a estimação do torque eletromagnético via RNAs, para a estimação da velocidade, também foi escolhida uma RNA *Perceptron Multi Camadas* (PMC), com duas camadas escondidas (as quais respeitam uma função de ativação logística), e uma camada de saída com a função de ativação linear. O algoritmo de treinamento de *Levenberg-Marquardt* (SILVA; SPATTI; FLAUZINO, 2010) também foi empregado na busca de um melhor aprendizado por parte das RNAs. Vale frisar que a mesma topologia será empregada, individualmente, para cada uma das dez possíveis situações de curtos-circuitos que serão comentadas a seguir.

□ Fase de treinamento e teste

Os padrões de treinamento e de teste para a estimação da velocidade do MIT, também foram gerados a partir de simulações executadas no *software DIgSILENT PowerFactory* possibilitando a obtenção das tensões, correntes e das velocidades para cada tipo de falta aplicada no SEI.

Para a estimação da velocidade o conjunto de dados geral foi formado por 60 sinais, constituídos pelos dez tipos de curtos-circuitos passíveis de ocorrência sobre o SEI, assim como anteriormente já apresentados para a estimação do torque eletromagnético (Tabela 18).

Os passos para a criação do conjunto de dados geral, também seguem os já apresentados anteriormente, a saber:

- . Cada classe de falta é formada por seis tipos de diferentes faltas. Estas são divididas em duas faltas por cada uma das três barras do SEI, com um ângulo de incidência à 0° , e à 90° ;
- . O conjunto de treinamento dos dados de entrada recebe as três tensões e as três correntes. Já os dados de saída recebem as velocidades;
- . Cada padrão do conjunto de dados é constituído por 6 sinais de 256 amostras na entrada, e um sinal de 256 amostras na saída. Ao todo foram utilizados 1.536 amostras para formar o conjunto de dados, para cada situação de curto-circuito desejada.

Ainda sobre o conjunto de dados formulado, foi executado um pré-processamento nos sinais de entrada das tensões e correntes, bem como da saída que representa a velocidade associada. Neste pré-processamento, assim como para a estimação do torque, foi efetuado o cálculo do valor médio entre duas amostras, tanto para os sinais da entrada, como para os da saída. Com base no deslocamento de amostra-amostra sobre as 256 amostras pertinentes a cada situação, foi calculado o valor médio entre cada duas amostras.

Com relação à escolha das topologias para as dez RNAs, algumas candidatas de redes PMCs foram apontadas inicialmente, a saber:

- Topologia candidata 1: 10 neurônios na primeira camada escondida, 5 neurônios na segunda camada escondida;
- Topologia candidata 2: 10 neurônios na primeira camada escondida, 10 neurônios na segunda camada escondida;
- Topologia candidata 3: 20 neurônios na primeira camada escondida, 10 neurônios na segunda camada escondida;
- Topologia candidata 4: 30 neurônios na primeira camada escondida, 10 neurônios na segunda camada escondida; e
- Topologia candidata 5: 40 neurônios na primeira camada escondida, 20 neurônios na segunda camada escondida.

Após executar o treinamento e testes nas topologias candidatas da PMC, também foi escolhida a topologia candidata 5 para a estimação da velocidade. A Tabela 23 apresenta os principais parâmetros da rede utilizada para a estimação da velocidade. Cabe afirmar que a mesma topologia será empregada para a estimação da velocidade, considerando os dez tipos distintos de curtos-circuitos que possam vir a ocorrer sobre o SEI.

A Figura 49 ilustra os resultados obtidos por esta topologia após as etapas de treinamento e teste para uma específica situação de defeito envolvendo a fase *A* com conexão a terra.

A Tabela 24 apresenta os resultados obtidos quando o MAPE, o MSE e o Desvio Padrão foram calculados para a referida situação avaliada.

□ Fase de validação

Para a validação das RNAs direcionadas à estimação da velocidade, utilizou-se, com pequenas adaptações a este problema, do mesmo banco de dados anteriormente formatado para a estimação do torque (Tabela 21). Vale lembrar e afirmar que o mesmo pré-processamento anteriormente realizado para o conjunto geral dos dados

Tabela 23: Parâmetros da RNA utilizada.

Arquitetura da rede	Perceptron multicamadas
Tipo de treinamento	Supervisionado
Número de neurônios na primeira camada escondida	40
Número de neurônios na segunda camada escondida	20
Algoritmo de treinamento	Levenberg-Marquardt (<i>back-propagation</i>)
Épocas	1.000
Erro quadrático médio	$1e^{-5}$
Função de ativação das camadas escondidas	Logística
Função de ativação da camada saída	Linear

Figura 49: Resposta da RNA na estimação da velocidade para uma específica situação de curto-circuito.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 24: Avaliação da estimação da velocidade para uma específica situação de curto-circuito.

$MAPE$ (%)	MSE (p.u.)	Desvio Padrão (p.u.)
$3,52e^{-3}$	$2,83e^{-9}$	$5,32e^{-5}$

(treinamento e teste), considerando a média entre duas amostras da entrada e/ou saída, também foi aplicado sobre este conjunto de validação.

Neste sentido, segue a Figura 50 que ilustra os resultados obtidos pela RNA treinada.

Estes resultados são referentes a uma específica situação de defeito envolvendo a fase A com conexão a terra.

Figura 50: Resposta da RNA para a fase de validação na estimação da velocidade.

A Tabela 25 apresenta os resultados obtidos quando o MAPE, o MSE e o Desvio Padrão foram calculados para a referida situação.

Tabela 25: Resultados obtidos para uma específica situação de curto-circuito no processo de validação da estimação da velocidade.

<i>MAPE (%)</i>	<i>MSE (p.u.)</i>	<i>Desvio Padrão (p.u.)</i>
$1,29e^{-1}$	$6,47e^{-6}$	$2,24e^{-3}$

Topologia geral adotada para a estimação do torque eletromagnético e da velocidade

Apenas para ressaltar, a Figura 51 apresenta a topologia das RNAs finais implementadas para estimar tanto o torque eletromagnético, como a velocidade dos MITs em análise. Cabe afirmar que com esta configuração, obtiveram-se os melhores resultados para estimação tanto do torque eletromagnético quanto da velocidade do MIT analisado.

Pela finalização do processamento referente ao Bloco 11, todas as informações desejadas e compiladas por este e pelos blocos antecessores são disponibilizadas aos operadores do sistema via a *Interface Homem/Máquina* (IHM) caracterizada pelo Bloco 12 na Figura 42.

Figura 51: Topologia geral das redes neurais artificiais implementadas.

Fonte: Próprio autor.

4.4 Considerações Parciais

Neste capítulo, foram apresentados os tipos de monitoramento de QEE existentes atualmente, o IED associado ao MIT, e a metodologia proposta para o diagnóstico e análise da influência dos afundamentos e interrupções de tensão nos MITs.

Por meio da apresentação da metodologia proposta, verificou-se as funcionalidades da detecção e classificação das ocorrências, bem como da estimação do torque eletromagnético e da velocidade do MIT em análise.

Por meio do emprego da Transformada *Wavelet* (TW), foram definidos os limiares de detecção do início e de transição dos eventos.

A Função Densidade de Probabilidade (FDP), em conjunto com a Correlação Cruzada (CC), proporcionou a classificação de cada evento detectado. Isto foi possível em função dos limiares definidos para a classificação. Desta maneira, os eventos foram classificados pelo tipo da ocorrência, e pelas fases e barramentos envolvidos no distúrbio.

Para estimar o torque eletromagnético e a velocidade em um MIT foram empregadas várias RNAs com topologias semelhantes, as quais permitiram apontar certa generalização e aprendizagem sobre os problemas apresentados.

Na sequência, apresenta-se o capítulo 5. Neste, serão apresentados e discutidos os resultados do comportamento do Motor 1 quando aplicado o algoritmo desenvolvido para o diagnóstico e análise da influência dos afundamentos e interrupções de tensão passíveis de ocorrência em um SEI.

Apresentação e Discussão dos Resultados

Esta seção apresenta os resultados do comportamento do Motor 1 quando aplicado o algoritmo desenvolvido para a metodologia proposta conforme apresentada no Capítulo (4). Sobre o SEI em análise foram geradas situações representativas de operações que caracterizaram interrupções e afundamentos de tensão, sendo que estas permitiram caracterizar os fenômenos desejados conforme as definições estabelecidas pelo IEEE Standard 1159-1995 (IEEE, 1995).

Para gerar o banco de dados, foram simuladas 91 situações de faltas, como: trifásica; monofásicas, e bifásicas com e sem o envolvimento da terra em cada um dos barramentos do SEI, considerando a variação do ângulo de incidência do defeito de 0° à 90° , resistência do defeito de zero ohm, e tempo de duração do distúrbio (td) de 30 ciclos (500 ms).

As medições foram realizadas no Barramento de Média Tensão do Motor (BMTM) para todas as situações de faltas aplicadas. Cada uma das situações consideradas contém 2 segundos de duração que contemplam: o tempo em regime permanente; o período sob o efeito de um distúrbio; e o restabelecimento do sistema.

Os quatro casos aqui apresentados são referentes aos dados da Tabela 21 do capítulo 4. Estes casos fazem parte do banco de dados de validação das RNAs e alguns destes serão analisados neste capítulo. Vale salientar que para todos os sinais criados no banco de dados de validação a falta foi inserida no instante de 0,2 segundos. Cabe esclarecer que este banco de dados utilizado para a validação não contempla os casos de situações de curtos-circuitos sobre o barramento B1/BAT 138 kV, pois tais situações são muito semelhantes aos sinais já utilizados no banco de dados de treinamento e teste das RNAs.

Além dos resultados apresentados para os quatro casos neste capítulo, serão apresentados no **Apêndice B** todos os limiares de classificação e os índices obtidos para o treinamento e a validação das RNAs.

Desta forma, serão apresentados os resultados obtidos via o Motor 1 seguindo o fluxograma da Figura 42 apresentada no capítulo 4.

5.1 Análise das tensões trifásicas: falta trifásica no barramento B2/BMT - 11,95 kV

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos na fase de detecção, classificação e de estimação para o caso de curto-circuito trifásico aplicado no barramento BMT.

5.1.1 Detecção

Este módulo é responsável pela detecção e a localização no tempo das alterações na forma de onda observadas nas tensões trifásicas. Inicialmente, a Figura 52 apresenta os sinais registrados e referentes a uma situação de curto-circuito franco envolvendo as fases *A*, *B* e *C*, aplicada no barramento B2/BMT de 11,95 kV, com ângulo de incidência da falta de 73° , com início da descontinuidade a 0,200 segundos.

Figura 52: Sinais das tensões referentes a um curto-circuito trifásico franco no B2/BMT.

Pela análise visual da Figura 53, pode-se induzir a classificar a ocorrência como sendo de um afundamento de tensão.

Sendo assim, o evento foi detectado e analisado nas três fases do barramento B3/BMTM do Motor 1. Verifica-se pelas Figuras 54, 55 e 56 que a janela apontada pela execução do algoritmo de detecção da TWD indica o ponto de início do distúrbio corretamente para todas as fases envolvidas.

A janela de dados contendo o início do evento foi apontada pelo algoritmo de detecção no instante de tempo igual em 0,200 segundos para as três fases simultaneamente, mostrando-se eficiente e com precisão na detecção do início do segmento de transição.

Após detectado o início do evento, tem-se a classificação da ocorrência.

Figura 53: Sinais das tensões referentes a um curto-circuito trifásico franco registradas no B3/BMTM.

Figura 54: Detecção da falta trifásica para a fase A no barramento B3/BMTM.

Figura 55: Detecção da falta trifásica para a fase B no barramento B3/BMTM.

Figura 56: Detecção da falta trifásica para a fase *C* no barramento B3/BMTM.

5.1.2 Classificação

Este módulo realiza a classificação dos eventos através da análise dos histogramas e pelo cálculo da Correlação Cruzada (CC) dos sinais. Mediante a situação de falta aplicada, efetua-se a classificação com a análise do histograma nas três fases, sendo este uma aproximação da FDP, e pelo cálculo da CC entre as tensões trifásicas medidas no barramento B3/BMTM e os outros barramentos B2/BMT e B1/BAT.

A Figura 57 apresenta um ciclo do sinal de tensão pós falta referente às fases *A*, *B* e *C* monitoradas no barramento B3/BMTM no Motor 1, para o curto-circuito trifásico franco aplicado no barramento B2/BMT.

Figura 57: Um ciclo do sinal de tensão pós falta referente a falta trifásica monitorada no barramento B3/BMTM no Motor 1.

Mediante tal situação aplicada, prossegue-se na análise do histograma para cada fase. A Figura 58 apresenta o histograma para as frequências de ocorrências de amplitude do

signal de tensão da fase *A*, sendo possível observar que as barras no eixo horizontal se estendem até a amplitude máxima do sinal próximo de 0,100 (p.u.).

Figura 58: Gráfico de histograma e da FDP para a fase *A*.

As Figuras 59 e 60 representam o histograma para as frequências de ocorrências de amplitude do sinal de tensão das fases *B* e *C*. Observa-se que as barras no eixo horizontal também indicam a amplitude máxima dos sinais próximos à 0,100 (p.u.).

Figura 59: Gráfico de histograma e da FDP para a fase *B*.

Efetua-se então o cálculo da CC entre as tensões trifásicas medidas no barramento B3/BMTM e os outros barramentos B2/BMT e B1/BAT, obtendo a partir desta correlação, o barramento de ocorrência da falta. Os valores máximos obtidos para cada fase de tensão analisada são apresentados na Tabela 26. Verifica-se pela tabela que os valores máximos obtidos atendem aos limiares para a classificação anteriormente estabelecidos.

A partir do algoritmo desenvolvido, através da análise dos histogramas foi obtido o menor valor para cada fase do sinal de tensão, sendo que este para a fase *A* é de 0,107 (p.u.), na fase *B* de 0,103 (p.u.), e na fase *C* de 0,098 (p.u.). A resposta obtida pela CC

Figura 60: Gráfico de histograma e da FDP para a fase *C*.

Tabela 26: Valores da correlação cruzada para um curto-circuito trifásico franco.

<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,002	0,007	0,000	73°
0,000 - 0,007	0,000 - 0,007	0,000 - 0,007	Limiares da classificação

dos valores máximos para cada fase são: fase *A* de 0,002; fase *B* de 0,007; e fase *C* de 0,000.

Como resultado para a situação de defeito envolvendo as fases *A*, *B* e *C* (falta trifásica), aplicada no barramento B2/BMT 11,95 kV, ângulo de incidência de 73°, resistência do defeito de zero ohm, obtém-se a seguinte resposta do classificador, conforme apresentada pela Tabela 27.

Tabela 27: Resposta do classificador para uma falta trifásica aplicada no barramento B2/BMT.

Tensão remanescente na <i>Fase A</i>	0,107 (p.u.)
Tensão remanescente na <i>Fase B</i>	0,103 (p.u.)
Tensão remanescente na <i>Fase C</i>	0,098 (p.u.)
Tipo de Distúrbio	Interrupção de tensão
<i>Fases envolvidas</i>	Fases <i>A</i> , <i>B</i> e <i>C</i>
<i>Barramento envolvido</i>	BMT

Neste item quando da análise do histograma para cada fase, ressalta-se que os gráficos de histograma apresentam um número de ocorrências versus a amplitude do sinal em análise distribuídos em uma quantidade menor de barras (retângulos). Para este tipo de falta é possível efetuar a classificação do evento com aproximadamente 25 barras (retângulos), mantendo a precisão do classificador.

A partir da resposta obtida pelo classificador é enviado um sinal de alerta para a RNA (Bloco 11) e as informações referentes a Tabela 27 são disponibilizadas para a IHM (Bloco 12).

5.1.3 Estimação do torque eletromagnético e da velocidade no Motor 1

Este módulo realiza a estimação do torque eletromagnético e da velocidade no eixo do Motor 1 através da aplicação de RNAs, utilizando duas redes idênticas, uma para estimar o torque eletromagnético e outra para estimar a velocidade, para cada um dos dez tipos possíveis de curtos-circuitos sobre o SEI em análise.

Neste caso, após efetuada a classificação do evento, o módulo de classificação ativa a RNA correspondente à falta trifásica.

A Figura 61 ilustra o resultado obtido pela RNA (Torque Estimado), em comparação com o Torque de Referência, para a situação de defeito envolvendo as fases *A*, *B* e *C*.

Figura 61: Resposta da RNA para o torque eletromagnético frente a falta trifásica experimentada.

Analisando a Figura 61, observa-se que o torque eletromagnético apresentou um valor de pico próximo de 4,0 p.u., estando quase 50 % acima do torque de partida nominal apresentado na Tabela 10. Nesta condição, quando da inversão dos valores de torque, o motor se comportará como um gerador no período da falta, fornecendo corrente para o defeito.

A Tabela 28 apresenta os índices (cálculos) obtidos para o MAPE, MSE e o Desvio Padrão referentes a validação da RNA destinada à estimação do torque (Bloco 11).

Tabela 28: Índices obtidos na validação do torque eletromagnético para a falta trifásica em análise.

<i>MAPE</i> (%)	<i>MSE</i> (p.u.)	Desvio Padrão (p.u.)
7,50	$9,06e^{-2}$	$2,85e^{-1}$

Já para a estimação da velocidade, a Figura 62 ilustra os resultados obtidos pela RNA (Velocidade Estimada), também em comparação à Velocidade de Referência, referente à uma situação de defeito envolvendo as fases *A*, *B* e *C* (falta trifásica).

Figura 62: Resposta da RNA para a velocidade frente a falta trifásica experimentada.

Analisando a Figura 62, tem-se que o Motor 1 sofreu um decréscimo de aproximadamente 8 % da sua velocidade nominal. Esta queda de velocidade é caracterizada devido ao desbalanceamento de tensão entre suas fases, conforme apresentado na Tabela 27 pela variação das tensões remanescentes.

A Tabela 29 apresenta os resultados obtidos para o MAPE, MSE e o Desvio Padrão referente a validação da RNA direcionada para a velocidade (Bloco 11).

Tabela 29: Índices obtidos na validação da velocidade para falta trifásica.

<i>MAPE</i> (%)	<i>MSE</i> (p.u.)	Desvio Padrão (p.u.)
$3,41e^{-1}$	$3,50e^{-5}$	$5,89e^{-3}$

Nesta seção, foram apresentados os resultados obtidos pela estrutura das RNAs responsáveis pela estimação do torque eletromagnético e velocidade no eixo do Motor 1 sob

análise, frente a uma situação de curto-circuito trifásico franco. Através da análise da Tabela 28, observa-se que a RNA direcionada para a estimação do torque eletromagnético apresentou índices de erros baixos para o MSE e o Desvio Padrão, mostrando que a RNA associada conseguiu um bom aprendizado e generalização dos dados apresentados.

Analisando a Tabela 29, referente à resposta da RNA que estima a velocidade no eixo do Motor 1, observa-se que a rede apresentou índices de erros baixos para o MSE e o Desvio Padrão. Mas, visualmente apresenta um erro mais pronunciado da velocidade estimada em relação à velocidade de referência durante as 40 amostras iniciais. Após este intervalo a rede apresentou uma tendência em estimar a velocidade com um erro menor.

É interessante observar que a RNA associada à velocidade aparenta apresentar um erro de maior magnitude em relação a RNA do torque, mas quando da análise dos índices de validação obtidos, percebe-se que os índices MAPE, MSE e Desvio Padrão obtidos na rede da velocidade são menores que os mesmos índices obtidos pela RNA do torque.

5.2 Análise das tensões trifásicas: falta bifásica no barramento B2/BMT - 11,95 kV

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos para a detecção, classificação e estimação para o caso de curto-circuito bifásico envolvendo as fases *C* e *A* aplicado no barramento BMT.

5.2.1 Detecção

A Figura 63 ilustra a situação de defeito envolvendo as fases *C* e *A*, aplicada no barramento B2/BMT de 11,95 kV, com ângulo de incidência de 10° , com instante inicial da descontinuidade a 0,200 segundos.

Figura 63: Sinais das tensões referentes a um curto-circuito bifásico envolvendo as fases *C* e *A* no B2/BMT.

Nesta situação, observa-se um afundamento de tensão trifásico nas fases *A*, *B* e *C* das fases sãs do barramento do Motor 1, conforme apresentado na Figura 64.

Figura 64: Sinais das tensões referentes a um curto-circuito bifásico envolvendo as fases *C* e *A* no B3/BMTM.

Analisando as três fases do barramento B3/BMTM do Motor 1, verifica-se através das Figuras 65, 66 e 67 que a janela apontada pelo algoritmo de detecção da TWD indica corretamente o ponto de início dos distúrbios para todas as fases.

Figura 65: Detecção da falta bifásica para a fase *A* no barramento B3/BMTM.

A janela de dados contendo o início do evento foi apontada pelo algoritmo de detecção no instante de tempo igual em 0,200 segundos para as três fases simultaneamente, mostrando-se eficiente e preciso na detecção do início do segmento de transição.

Após detectado o início do evento, segue-se para a classificação.

Figura 66: Detecção da falta bifásica para a fase B no barramento B3/BMTM.

Figura 67: Detecção da falta bifásica para a fase C no barramento B3/BMTM.

5.2.2 Classificação

Mediante a situação de falta aplicada, efetua-se a classificação com a análise do histograma nas três fases e o cálculo da CC entre as tensões trifásicas medidas no barramento B3/BMTM e os outros barramentos B2/BMT e B1/BAT.

A Figura 68 apresenta um ciclo do sinal de tensão pós falta referente às fases A, B e C monitoradas no barramento B3/BMTM no Motor 1, para um curto-circuito entre as fases C e A aplicado no barramento B2/BMT.

Deste ponto, prossegue-se para a análise do histograma para cada fase. A Figura 69 apresenta o histograma para as frequências de ocorrências de amplitude do sinal de tensão da fase A, sendo possível observar que as barras no eixo horizontal se estendem até a amplitude máxima do sinal próximo de 0,100 (p.u.).

As Figuras 70 e 71 representam o histograma para as frequências de ocorrência de amplitude do sinal de tensão das fases B e C. Observa-se que as barras no eixo horizontal

Figura 68: Um ciclo do sinal de tensão pós falta referente à falta entre as fases *C* e *A* monitoradas no barramento B3/BMTM no Motor 1.

Figura 69: Gráfico de histograma e da FDP para a fase *A*.

indicam a amplitude máxima dos sinais próximos de 0,800 (p.u.).

Efetua-se então o cálculo da CC entre as tensões trifásicas medidas no barramento B3/BMTM e os outros barramentos B2/BMT e B1/BAT, obtendo a partir desta correlação, em qual o barramento a falta ocorreu. Os valores máximos obtidos para cada fase da tensão analisada são apresentados na Tabela 30. Verifica-se que os valores máximos obtidos atendem aos limiares da classificação pré-estabelecidos.

Tabela 30: Valores da correlação cruzada para uma falta envolvendo as fases *C* e *A*.

<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,025	0,430	0,194	10°
0,020 - 0,030	0,420 - 0,440	0,190 - 0,210	Limiares para a classificação

Figura 70: Gráfico de histograma e da FDP para a fase B.

Figura 71: Gráfico de histograma e da FDP para a fase C.

Como resultado para o exemplo apresentado da situação de defeito envolvendo as fases C e A, aplicado no barramento B2/BMT de 11,95 kV, com ângulo de incidência de 10° , resistência do defeito de zero ohm, obtém-se a seguinte resposta do classificador, conforme apresentado na Tabela 31.

Após análise do histograma para cada fase, ressalta-se que para a fase A o gráfico de histograma apresenta um número de ocorrências versus amplitude do sinal em análise distribuídos em aproximadamente 25 barras (retângulos), e as fases B e C apresentam uma distribuição com aproximadamente 50 barras (retângulos).

Para este tipo de falta é possível efetuar a classificação do evento para 25 e/ou 50 barras (retângulos), mantendo a precisão do classificador.

A partir da resposta obtida pelo classificador é enviado um sinal de alerta para a RNA (Bloco 11) e as informações referentes a Tabela 31 são enviadas para visualização na IHM (Bloco 12).

Tabela 31: Resposta do classificador para uma falta envolvendo as fases *C* e *A*.

Tensão remanescente na <i>Fase A</i>	0,122 (p.u.)
Tensão remanescente na <i>Fase B</i>	0,865 (p.u.)
Tensão remanescente na <i>Fase C</i>	0,781 (p.u.)
Tipo de Distúrbio	Afundamento de tensão
<i>Fases envolvidas</i>	Fases C A
<i>Barramento envolvido</i>	BMT

5.2.3 Estimação do torque eletromagnético e da velocidade no Motor 1

Segue a Figura 72 ilustrando os resultados obtidos pela RNA responsável pela estimação do torque eletromagnético frente a situação de curto-circuito experimentada.

Figura 72: Resposta da RNA na validação do torque eletromagnético na falta entre fases *C* e *A*.

Fonte: Próprio autor.

Por meio da análise da Figura 72, observa-se que o torque eletromagnético para este tipo de falta é oscilante com valores de pico máximo entre 4,0 p.u. e 3,0 p.u.. Ressalta-se que os valores negativos do torque caracterizam que o motor nestas condições se comportará como um gerador no período da falta, fornecendo corrente para o defeito.

A Tabela 32 apresenta os resultados obtidos para o MAPE, MSE e o Desvio Padrão referentes à fase de validação.

Tabela 32: Índices obtidos na validação do torque eletromagnético para a falta entre fases C e A em análise.

<i>MAPE</i> (%)	<i>MSE</i> (p.u.)	Desvio Padrão (p.u.)
$4,79e^{-1}$	$1,05e^{-1}$	$3,24e^{-1}$

Segue a Figura 73 ilustrando os resultados obtidos pela RNA associada à estimação da velocidade no Motor 1.

Figura 73: Resposta da RNA para a velocidade frente a falta bifásica.

Fonte: Próprio autor.

Analisando a Figura 73, observa-se que a rede apresentou um erro considerável da velocidade estimada, em relação a velocidade de referência, durante as amostras iniciais. Contudo, acredita-se que isto é devido ao período transitório dos sinais em análise nos instantes iniciais da entrada da falta, o que vem a dificultar o aprendizado e a generalização por parte das RNAs.

A Tabela 33 apresenta os resultados obtidos para o MAPE, MSE e o Desvio Padrão referente a validação da RNA responsável pela estimação da velocidade (Bloco 11).

Tabela 33: Índices obtidos na validação da velocidade para a falta bifásica.

<i>MAPE</i> (%)	<i>MSE</i> (p.u.)	Desvio Padrão (p.u.)
$5,69e^{-1}$	$5,43e^{-5}$	$4,87e^{-3}$

Para esta situação de curto-circuito enfrentada, observa-se pelos resultados obtidos que os índices de erros foram baixos para as RNAs voltadas à estimação da velocidade

e do torque, respectivamente, caracterizando um bom aprendizado e generalização frente aos dados apresentados.

5.3 Análise das tensões trifásicas: falta monofásica (fase C) no barramento B3/BMTM - 4,16 kV

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos para a detecção, classificação e estimação para o caso de curto-circuito envolvendo a fase C com a conexão a terra aplicado no barramento BMTM.

5.3.1 Detecção

A Figura 74 caracteriza uma situação de defeito envolvendo a fase C com a conexão a terra aplicada no barramento B3/BMTM de 4,16 kV, com ângulo de incidência de 57° , com instante inicial da descontinuidade a 0,200 segundos.

Nesta situação, observa-se uma interrupção de tensão na fase C do barramento do motor.

Figura 74: Sinais das tensões referentes a um curto-circuito monofásico envolvendo a fase C no B3/BMTM.

Analisando as três fases no barramento B3/BMTM do Motor 1, verifica-se por meio das Figuras 75, 76 e 77 que a janela apontada pelo algoritmo de detecção da TWD vem a indicar corretamente o ponto de início dos distúrbios em todas as fases.

Como pode ser observado, a janela de dados contendo o início do evento foi apontada pelo algoritmo de detecção no instante de tempo igual em 0,200 segundos para as três fases simultaneamente, mostrando-se mais uma vez eficiente e preciso na detecção do início do segmento de transição.

Conforme implementado, na sequência, o módulo de classificação é ativado.

Figura 75: Detecção da falta monofásica para a fase A no barramento B3/BMTM.

Figura 76: Detecção da falta monofásica para a fase B no barramento B3/BMTM.

Figura 77: Detecção da falta monofásica para a fase C no barramento B3/BMTM.

5.3.2 Classificação

Efetua-se neste ponto, a classificação das ocorrências, com base na análise do histograma das três fases e o cálculo da CC entre as tensões trifásicas medidas no barramento B3/BMTM e os outros barramentos B1/BAT e B2/BMT.

A Figura 78 apresenta um ciclo do sinal de tensão pós falta referente às fases *A*, *B* e *C* monitoradas no barramento B3/BMTM no Motor 1, para o curto-circuito monofásico aplicado no barramento B3/BMTM.

Figura 78: Um ciclo do sinal de tensão pós falta referente à falta fase *C* - terra monitorada no barramento B3/BMTM no Motor 1.

Após análise do histograma para cada fase, a Figura 79 apresenta o histograma para as frequências de ocorrências de amplitude do sinal de tensão da fase *A*, sendo possível observar que as barras no eixo horizontal se estendem até a amplitude máxima do sinal próximo de 1,000 (p.u.).

Figura 79: Gráfico de Histograma e da FDP para a fase *A*.

As Figuras 80 e 81 representam o histograma para as frequências de ocorrências de amplitude do sinal de tensão das fases B e C. Observa-se que as barras no eixo horizontal indicam a amplitude máxima dos sinais para a fase B próximo de 0,800 (p.u.) e para a fase C com amplitude máxima próximo de 0,005 (p.u.).

Figura 80: Gráfico de Histograma e da FDP para a fase B.

Figura 81: Gráfico de Histograma e da FDP para a fase C.

Efetua-se agora o cálculo da CC entre as tensões trifásicas medidas no barramento B3/BMTM e os outros barramentos B1/BAT e B2/BMT, obtendo a partir desta correlação a indicação do barramento em falta. Sendo assim, os valores máximos obtidos para cada fase de tensão analisada são apresentados na Tabela 34. Verifica-se que os valores máximos obtidos também atendem aos limiares da classificação pré-estabelecidos.

Como resultado para o exemplo apresentado da situação de defeito envolvendo a fase C com conexão a terra, aplicada no barramento BMTM de 4,16 kV, com ângulo de incidência de 57°, resistência do defeito de zero ohm, obtém-se a seguinte resposta do classificador, conforme apresentado pela Tabela 35.

Tabela 34: Valores da correlação cruzada para uma falta envolvendo a fase C - terra.

<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,400	0,371	0,005	57°
0,390 - 0,490	0,350 - 0,430	0,000 - 0,010	Limiares da classificação

Tabela 35: Resposta do classificador para uma falta envolvendo a fase C - terra.

Tensão remanescente na <i>Fase A</i>	0,975 (p.u.)
Tensão remanescente na <i>Fase B</i>	0,875 (p.u.)
Tensão remanescente na <i>Fase C</i>	0,006 (p.u.)
Tipo de Distúrbio	Interrupção de tensão
<i>Fases envolvidas</i>	Fase C - Terra
<i>Barramento envolvido</i>	BMTM

Após análise do histograma para cada fase ressalta-se que para as fases *A* e *B* os gráficos de histogramas apresentam um número de ocorrências versus amplitude do sinal em análise distribuídos em 50 barras (retângulos). Já a fase *C* apresenta uma distribuição em uma única barra (retângulo) representando todos os valores próximo de zero deste sinal.

Para este tipo de falta é possível efetuar a classificação do evento para 50 barras e/ou uma única barra, mantendo a precisão do classificador.

A partir da resposta obtida pelo classificador é enviado um sinal de ativação para a respectiva RNA (Bloco 11) associada à este tipo de falta, e as informações referentes a Tabela 35 são enviadas para visualização na IHM (Bloco 12).

5.3.3 Estimação do torque eletromagnético e da velocidade no Motor 1

A Figura 82 ilustra os resultados obtidos pela RNA direcionada à estimação do torque eletromagnético tomando como base a situação de curto-circuito experimentada.

Com base na Figura 82, observa-se que o torque para este tipo de falta também é oscilante com valores de pico acima de 2,0 p.u. e 1,0 p.u.. Nestas condições, os valores negativos caracterizam que o motor se comportará como um gerador no período da falta, fornecendo corrente para o defeito.

Figura 82: Resposta da RNA na validação do torque eletromagnético para uma falta monofásica.

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 36 apresenta os resultados obtidos para o MAPE, MSE e o Desvio Padrão referentes ao processo de validação.

Tabela 36: Índices obtidos na validação do torque eletromagnético para uma falta fase C - terra.

MAPE (%)	MSE (p.u.)	Desvio Padrão (p.u.)
$2,39e^{-1}$	$4,17e^{-2}$	$1,92e^{-1}$

Pela Figura 83, apresentam-se os resultados obtidos pela RNA associada à estimação da velocidade no Motor 1 frente à situação de falta em análise.

Analisando a Figura 83 referente a resposta da RNA que estima a velocidade no eixo do MIT, observa-se que a rede não apresentou um bom comportamento da velocidade estimada em relação a velocidade de referência ao longo das amostras.

A Tabela 37 apresenta os resultados obtidos para o MAPE, MSE e o Desvio Padrão referente a validação da RNA (Bloco 11).

Tabela 37: Índices obtidos na validação da velocidade para a falta monofásica.

MAPE (%)	MSE (p.u.)	Desvio Padrão (p.u.)
$4,49e^{-1}$	$5,16e^{-5}$	$6,64e^{-3}$

Observou-se pelos resultados obtidos que a RNA destinada à estimação do torque e a RNA à estimação da velocidade apresentaram índices de erros baixos, mas somente

Figura 83: Resposta da RNA para a velocidade frente a falta monofásica.

Fonte: Próprio autor.

a RNA velocidade não obteve um bom aprendizado e generalização para este tipo de curto-circuito.

5.4 Análise das tensões trifásicas: falta bifásica com conexão a terra no barramento B3/BMTM - 4,16 kV

5.4.1 Detecção

A Figura 84 apresenta uma situação de defeito envolvendo as fases *A* e *B* com a conexão a terra aplicada no barramento B3/BMTM de 4,16 kV, com ângulo de incidência de 33° e de resistência da falta de 0 ohm, também iniciada a 0,200 segundos.

Nesta situação observa-se uma interrupção de tensão nas fases *A* e *B* no barramento do Motor 1.

Analisando as três fases no barramento B3/BMTM do Motor 1, verifica-se por meio das Figuras 85, 86 e 87 que a janela apontada pelo algoritmo de detecção da TWD também indica o ponto de início dos distúrbios corretamente para todas as fases.

A janela de dados contendo o início do evento foi novamente apontada pelo algoritmo de detecção no instante de tempo igual em 0,200 segundos para as três fases simultaneamente, mostrando-se eficiente e preciso na detecção do início do segmento de transição.

Como próximo passo, tem-se a ativação do módulo de classificação.

Figura 84: Sinais das tensões referentes a um curto-circuito bifásico com conexão a terra no B3/BMTM.

Figura 85: Detecção da falta bifásica a terra para a fase A no barramento B3/BMTM.

Figura 86: Detecção da falta bifásica a terra para a fase B no barramento B3/BMTM.

Figura 87: Detecção da falta bifásica a terra para a fase C no barramento B3/BMTM.

5.4.2 Classificação

A Figura 88 apresenta um ciclo do sinal de tensão pós falta referente às fases A , B e C monitoradas no barramento B3/BMTM no Motor 1, para um curto-circuito entre as fases A e B com conexão a terra aplicado no barramento B3/BMTM.

Figura 88: Um ciclo do sinal de tensão pós falta referente à falta bifásica a terra monitorada no barramento B3/BMTM no Motor 1.

As Figuras 89 e 90 trazem o histograma para as frequências de ocorrências de amplitude do sinal de tensão das fases A e B . Observa-se que as barras no eixo horizontal indicam a amplitude máxima dos sinais para as fases A e B com amplitude máxima próximo de 0,000 (p.u.).

A Figura 91 apresenta o histograma para as frequências de ocorrências de amplitude do sinal de tensão da fase C , sendo possível observar que as barras no eixo horizontal se estendem até a amplitude máxima do sinal próximo de 1,000 (p.u.).

Figura 89: Gráfico de histograma e da FDP para a fase A.

Figura 90: Gráfico de histograma e da FDP para a fase B.

Figura 91: Gráfico de histograma e da FDP para a fase C.

Na sequência, tem-se o cálculo da CC entre as tensões trifásicas medidas no barramento

B3/BMTM e os outros barramentos B2/BMT e B1/BAT. A partir desta correlação, tem-se a informação da localização da falta (barramento de ocorrência). Os valores máximos obtidos para cada fase de tensão analisada são apontados na Tabela 38. Verifica-se que os valores máximos obtidos atendem aos limiares da classificação pré-estabelecidos.

Tabela 38: Valores da correlação cruzada para uma falta envolvendo as fases *A* e *B* a terra.

<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,003	0,007	0,451	33°
0,000 - 0,008	0,000 - 0,008	0,360 - 0,460	Limiares da classificação

Como resultado para o exemplo apresentado da situação de defeito envolvendo as fases *A* e *B*, aplicado no barramento B3/BMTM de 4,16 kV, com ângulo de incidência de 33° e resistência do defeito de zero ohm, obtém-se a seguinte resposta do classificador, conforme apresentado pela Tabela 39.

Tabela 39: Resposta do classificador para uma falta envolvendo as fases *A* e *B* a terra.

Tensão remanescente na <i>Fase A</i>	0,003 (p.u.)
Tensão remanescente na <i>Fase B</i>	0,010 (p.u.)
Tensão remanescente na <i>Fase C</i>	0,919 (p.u.)
Tipo de Distúrbio	Interrupção de tensão
<i>Fases envolvidas</i>	Fases AB - Terra
<i>Barramento envolvido</i>	BMTM

Após análise individual dos histogramas para cada fase, ressalta-se que para as fases *A* e *B* os mesmos apresentam um número de ocorrências versus amplitude em uma única barra (retângulo) representando todos os valores próximo de zero deste sinal. Já a fase *C* apresenta uma distribuição em 50 barras (retângulos).

Assim como para os três casos já apresentados, a partir da resposta obtida pelo classificador é enviado um sinal de ativação para a RNA (Bloco 11), sendo as informações referentes a Tabela 39 disponibilizadas para a IHM (Bloco 12).

5.4.3 Estimação do torque eletromagnético e da velocidade no Motor 1

Segue a Figura 92 ilustrando os resultados obtidos pela RNA destinada a estimar o torque eletromagnético no Motor 1. Estes resultados são referentes a uma situação de defeito envolvendo as fases *A* e *B* com conexão a terra.

Figura 92: Resposta da RNA na validação do torque eletromagnético para uma falta entre fases *A* e *B* a terra.

Fonte: Próprio autor.

Via análise da Figura 92, observa-se que o torque eletromagnético apresentou valores negativos e oscilantes, variando acima de 4,0 p.u. e 3,0 p.u.. Nas condições apresentadas o motor se comportará como um gerador no período da falta, fornecendo corrente para o defeito.

A Tabela 40 apresenta os resultados obtidos para o MAPE, MSE e o Desvio Padrão referentes ao processo de validação.

Tabela 40: Resultados obtidos para a validação do torque eletromagnético para uma falta entre fases *A* e *B* a terra.

MAPE (%)	MSE (p.u.)	Desvio Padrão (p.u.)
$3,57e^1$	$3,25e^{-2}$	$1,68e^{-1}$

A estimação da velocidade por parte da RNA aplicada pode ser ilustrada pela Figura 93.

Analisando a Figura 93, observa-se que a rede apresentou uma variação entre a velocidade estimada e a velocidade de referência durante as amostras iniciais. Acredita-se

Figura 93: Resposta da RNA para a velocidade frente a falta bifásica a terra.

que esta situação é decorrente do período transitório dos sinais em análise nos instantes iniciais da entrada da falta, o que vem a dificultar o aprendizado e a generalização por parte das RNAs.

A Tabela 41 apresenta os resultados obtidos para o MAPE, MSE e o Desvio Padrão para a estimação da velocidade apresentada.

Tabela 41: Resultados obtidos para a validação da velocidade para uma falta entre fases *A* e *B* a terra.

<i>MAPE</i> (%)	<i>MSE</i> (p.u.)	Desvio Padrão (p.u.)
$1,96e^{-1}$	$1,01e^{-5}$	$3,18e^{-3}$

Para esta situação de curto-circuito enfrentada, observa-se pelos resultados obtidos que as RNAs voltadas à estimação da velocidade e do torque, apresentaram índices de erros baixos e atingiram um bom aprendizado e generalização frente aos dados apresentados.

Considerações gerais sobre o módulo de detecção e de classificação

Durante os testes do algoritmo de detecção, identificou-se que os curtos circuitos monofásicos com ângulo de incidência igual a 0° , para os barramentos B1/BAT e B2/BMT, quando monitorados pelo barramento B3/BMTM, não foram corretamente detectados. Do total de 91 situações, 6 não atenderam ao esperado quando analisadas pelo módulo de detecção. Pelo que foi constatado, para resolver este problema, a detecção nestes casos deve ser feita no barramento que originou a falta.

Contudo, vale frisar que considerando 100 % de acerto no módulo de detecção, todas as 91 situações de faltas foram corretamente detectadas, o módulo de classificação como implementado também garante 100 % de acerto. Ressalta-se que da análise do histograma para cada fase, obtém-se os gráficos de histograma que representam um número de ocorrências versus a amplitude do sinal em análise, distribuídos em barras (retângulos). A quantidade de barras (retângulos) se mostrou variável durante a análise dos distúrbios, onde para alguns casos a classificação foi feita com uma quantidade menor de barras (retângulos), não vindo a prejudicar o desempenho e a precisão do classificador como um todo.

5.5 Considerações Parciais

Os resultados obtidos com a utilização da TWD para efetuar a detecção e a localização no tempo das alterações na forma de onda foram muito satisfatórios, pois, com exceção dos seis casos anteriormente comentados, o algoritmo de detecção apontou o início dos distúrbios corretamente para todas as fases envolvidas com precisão.

A Função Densidade de Probabilidade (FDP), em conjunto com a Correlação Cruzada (CC), proporcionaram a classificação de cada evento detectado corretamente. Outro aspecto importante quando da classificação dos eventos foi a quantidade reduzida de barras no gráfico de histograma observada para determinadas situações, mantendo, mesmo assim, a precisão de acertos do classificador.

Na sequência, apresenta-se o capítulo 6. Neste, serão apresentadas as conclusões finais e sugestões para a continuidade desta pesquisa.

Conclusões

Este documento apresentou uma metodologia para o diagnóstico e análise da influência que os afundamentos e interrupções tem sobre os Motores de Indução Trifásicos (grande porte) por meio da aplicação da Transformada *Wavelet* (TW) na detecção das ocorrências dos eventos, na classificação dos eventos pela utilização das ferramentas estocásticas como a Função Densidade de Probabilidade (FDP) e a Correlação Cruzada (CC) e na estimação do torque eletromagnético e da velocidade no eixo do Motor de Indução Trifásico com a utilização das Redes Neurais Artificiais.

Nesta pesquisa foi apresentada uma metodologia com a função de aquistar os sinais instantâneos das tensões e correntes trifásicas nos barramentos do Sistema Elétrico Industrial modelado pelo *software DIgSILENT PowerFactory*, detectar e classificar os distúrbios observados no sistema, e fazer a estimação de forma não intrusiva do torque eletromagnético e da velocidade associada ao Motor de Indução Trifásico em análise.

No módulo de detecção foi utilizada a Transformada *Wavelet* (TW), a qual realiza a detecção e a localização no tempo das alterações observadas nos sinais das tensões trifásicas (valores instantâneos) em um pequeno intervalo de tempo. O algoritmo de detecção desenvolvido determinou se a janela do sinal em observação pertence a um segmento de evento e/ou de transição. Ressalta-se que, usualmente, nos trabalhos correlatos observados no contexto da QEE, somente os sinais pertencentes aos segmentos de evento são analisados. Já os segmentos de transição são descartados devido ao seu comportamento transitório ser de difícil análise. Desta forma, uma contribuição desta pesquisa, é o módulo de detecção implementado possibilitando a análise dos sinais incluindo o segmento de transição. No módulo de detecção, a TWD implementada acusou o início do segmento de transição no instante correto, com precisão e eficácia para todas as fases envolvidas, simultaneamente, em 93,4 % das situações testadas.

De uma maneira em geral, cabe afirmar que somente para os curtos-circuitos monofásicos com ângulo de incidência igual a 0° , para os barramentos mais distantes, quando monitorados pelo barramento do motor, não foram corretamente detectados. Do total das 91 situações avaliadas, 6 situações não atenderam ao esperado quando analisadas

pelo módulo de detecção.

Pelo módulo de classificação, os eventos foram classificados através da análise dos histogramas e pelo cálculo da correlação cruzada dos sinais de pós-falta contendo os segmentos de transição. Uma característica importante do classificador implementado é a sua capacidade de identificar o tipo de distúrbio, e qual a sua localização no sistema, com apenas uma janela de dados (256 amostras/ciclo) do sinal de pós-falta (incluindo o segmento de transição), onde 100 % das situações testadas foram corretamente classificadas. Quando da análise do histograma para cada fase, obtém-se os gráficos de histograma que representam um número de ocorrências versus a amplitude do sinal em análise distribuídos em barras (retângulos). A quantidade de barras (retângulos) se mostrou variável durante o desenvolvimento da pesquisa, onde, para alguns casos, a classificação foi feita com uma quantidade menor de barras (retângulos), não prejudicando o desempenho e a precisão do classificador. Uma das contribuições deste trabalho está então, na aplicação das ferramentas estocásticas (FDP e CC) na classificação dos distúrbios em um SEI, pois até o momento, com base na literatura consultada, não foram observados trabalhos com este foco.

No módulo de estimação foram implementadas Redes Neurais Artificiais para estimar o torque eletromagnético e a velocidade no eixo do motor de indução trifásico em análise. Considerando-se que os sinais a serem estimados retratam uma região de instabilidade, ou seja, os quais contêm os segmentos de transição dos sinais de tensão e corrente, e um banco de dados ainda pequeno no seu volume, infere-se que os resultados obtidos pelas RNAs foram bons, retratando baixos índices, como os caracterizados pelo MAPE, MSE e Desvio Padrão. Ressalta-se que a estimação do torque eletromagnético e a estimação da velocidade obtiveram um desvio padrão máximo de 1,68 p.u. e 0,02 p.u., respectivamente. Na estimação do torque eletromagnético os resultados apresentaram torques oscilantes com valores de pico entre 4,0 p.u. e 3,0 p.u.. Desta forma, os valores negativos dos torques caracterizam que o MIT nestas condições se comporta como um gerador no período da falta, fornecendo corrente para o curto-circuito manifestado.

Para finalizar, cabe comentar que esta pesquisa, conforme conduzida, insere-se em um cenário contemporâneo de grande interesse pelos profissionais envolvidos com atividades relativas a aplicação de técnicas não intrusivas para o monitoramento dos problemas nos MITs. Afirmar-se este contexto, visto que as ferramentas utilizadas nesta pesquisa podem ser aplicadas em um sistema supervisorio no diagnóstico e estimação de parâmetros para os MITs, dando abertura para futuras análises preditivas.

As sugestões propostas para a continuidade da pesquisa são:

- Inserir uma quantidade maior de motores de indução trifásicos no sistema utilizado e verificar o desempenho do algoritmo implementado;

- ❑ Efetuar estudo investigativo com outras ferramentas estocásticas para verificar o desempenho do classificador;
- ❑ Executar novas simulações variando o ângulo de incidência do defeito entre 0° e 90° para aumentar a quantidade de casos no banco de dados de treinamento e teste das RNAs, podendo assim, melhorar os resultados encontrados;
- ❑ Testar novas topologias de redes neurais artificiais que possam prever o torque eletromagnético e a velocidade no eixo do motor;
- ❑ Efetuar uma montagem prática laboratorial envolvendo a aplicação de equipamentos como o *Real Time Digital Simulator* (RTDS), IED e *hardware* para implementação do algoritmo desenvolvido nesta tese;
- ❑ Considerar as correntes para melhorar a caracterização dos efeitos do SEI sobre o MIT;
- ❑ Aproveitar a estrutura existente para compor um módulo de estimação da eficiência do MIT;
- ❑ Testar a robustez do método proposto por meio da variação das cargas, resistência de falta e a partida de outros MITs no SEI.

Referências

- ABB. **Motor Protection Relay REM610**. US, 2011. Disponível em “<http://library.e.abb.com>”. Acesso em: 19.02.2016.
- ADDISON, P. S. **The illustrated wavelet transform handbook: Introductory theory and applications in science, engineering, medicine and finance**. London, UK: Institute of Physics Publishing, 2002. ISBN 0-7503-0692-0.
- ANDO, O. H.; LEBORGNE, R. C.; BRETAS, A. S. Desenvolvimento de uma metodologia para cálculo e gerenciamento de indicadores de qualidade da energia elétrica. In: CBQEE. **VIII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica**. Blumenau, SC, 2009.
- ARDO, H.; AGSTROM, K. Bayesian formulation of image patch matching using cross-correlation. **Journal of Mathematical Imaging and Vision**, 2011. May 2011.
- BALZI, A. Monitoramento da qualidade da energia elétrica baseados em dispositivos de controle e proteção microprocessados. **VI Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica**, 2005. CIGRÉ, p. 261–265, 2005.
- BARAN, M. E.; KIM, J. A classifier for distribution feeder overcurrent analysis. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2006. IEEE, v. 21, p. 456–462, 2006.
- BARBOSA, D. **Sistema híbrido inteligente para o monitoramento e proteção de transformadores de potência**. Tese (Doutorado) — São Carlos - Universidade de São Paulo, 2010.
- BERNARDES, R.; AYELLO, F. SMQEE - Sistema de monitoramento da qualidade de energia elétrica. In: IEEE. **VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais**. Poços de Caldas, MG, 2008. p. 76–81.
- BERNARDES, R.; ROCHA, G. Monitoramento de motores assíncronos através de relés de proteção avançados. In: CBQEE. **VIII Conferência Brasileira de Qualidade da Energia Elétrica**. Blumenau, SC, 2009.
- BERTON, P. L. **Análise e implementação de técnicas de medição de microvibrações utilizando interferometria óptica e processadores digitais de sinais**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2013.

BOLLEN, M. H. J.; GU, I. Y. H. **Signal Processing of Power Quality Disturbances**. Canada: John Wiley & Sons, 2006.

BOLLEN, M. H. J.; RIBEIRO, P.; GU, I. Y. H.; DUQUE, C. A. Trends, challenges and opportunities in power quality research. **European Transactions on Electrical Power**, 2009. p. 1–16, 2009.

BORGES, T. V. **Processamento de sinais de atividade elétrica neuronal a partir de ferramentas matemáticas clássicas**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2009.

BRANCO, H. M. G. C. **Uma estratégia para a detecção e classificação de transitórios em transformadores de potência pela utilização da transformada *Wavelet* e da lógica *Fuzzy***. Dissertação (Mestrado) — São Carlos - Universidade de São Paulo, 2009.

BULGARELLI, R. **Proteção térmica de motores de indução trifásicos industriais**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2006.

COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. **Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: dos Relés Eletromecânicos aos Microprocessados Inteligentes**. São Paulo: São Carlos: Universidade de São Paulo, 1999. ISBN 978-85-85205-78-2.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. Washington, D.C.: Thomson Learning, 2006.

DIGSILENT. **DIgSILENT PowerFactory - Power System Analysis Software**. Germany, 2010. Disponível em “<http://www.digsilent.de>”.

DRANETZ. **Catalog Power Quality Analyzer**. Edison, New Jersey, 2003. Disponível em “<http://www.dranetz-bmi.com>”. Acesso em: 02.01.2016.

DUGAN, R.; F., M. M.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W. **Electrical power systems quality**. 2nd. ed. New York: Editora McGraw-Hill, 2002.

EATON. **MP-3000 Motor Protection**. US, 2009. Disponível em “<http://www.eaton.in>”. Acesso em: 19.02.2016.

ELETOBRAS. **Relatório de Resultados do Procel 2014 - ano base 2013**. Rio de Janeiro, RJ: Eletrobras Procel, 2014.

EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2014 - ano base 2013**. Rio de Janeiro, RJ: Empresa de Pesquisa Energética - epe, 2014.

FAN, W.; LIAO, Y.; LAUGHNER, T.; ROGERS, B.; PITTS, G.; WOOTEN, J. L.; ROSSMAN, J.; ELMENDORF, F. Intelligent data analysis for power systems. In: IEEE PES. **IEEE PES General Meeting**. San Diego, CA, 2012. ISBN 978-1-4673-2728-2.

FELCE, A.; MATAS, G.; SILVA, Y. Voltage sag analysis and solution for an industrial plant with embedded induction motors. In: IEEE. **39th IAS Annual Meeting Industry Applications Conference Record of the 2004**. Seattle, Washington, 2004.

FLUKE. **Manual Analisador de Qualidade de Potência e Energia Trifásico**. São Paulo, SP, 2012. Disponível em “<http://www.fluke.com/br>”. Acesso em: 02.01.2016.

GANG, Z.; DUFFY, A.; SASSE, H.; LIXIN, W. The use of probability density funtions to improve the interpretation of FSV results. In: IEEE. **IEEE International Symposium on Electromagnetic Compability (EMC)**. Pittsburgh, PA, 2012. p. 685–689.

GHANDEHARI, R.; JALILIAN, A. Economical impacts of power quality in power systems. **Universities Power Engineering Conference, UPEC 2004**, 2004. v. 2, p. 893–897, 2004.

GIBELLI, G. B.; BRANCO, H. M. G. C.; OLESKOVICZ, M. Aplicação de redes neurais artificiais para o monitoramento da velocidade e torque no motor de indução trifásico na presença de distúrbios de qualidade da energia elétrica. In: IEEE PES. **IEEE PES Transmition & Distribution Conference and Exposition Latin America**. São Paulo, 2010.

GOEDEL, A. **Estimador de velocidade em motores de indução trifásicos usando redes neurais artificiais**. Tese (Doutorado) — São Carlos - Universidade de São Paulo, 2007.

GOEDEL, A.; SILVA, I. N.; SERNI, P. J. A.; SUETAKE, M.; NASCIMENTO, C. F.; SILVA, S. A. O. da. Speed estimation for induction motor using neural networks method. **IEEE Latin America Transactions**, 2013. p. 768–778, March 2013.

GRANADO, A. G. **Estudo de estimadores de correlação baseados no emprego de quantização grosseira e dithering**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, 1994.

HART, D. G.; PETERSON, W.; UY, D.; SCHNEIDER, J.; NOVOSEL, D.; WRIGHT, R. Tapping protective relays for power quality information. **IEEE Computer Applications in Power**, 2000. p. 45–49, jan 2000. ISSN 0895-0156.

HAYKIN, S. **Sistemas de comunicação: analógicos e digitais**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004. ISBN 85-7307-936-3.

IEC. **IEC 61000-4-30 Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods**. New York: IEC, 2003.

IEEE. **IEEE 1159 Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality**. New York: [s.n.], 1995.

IMS. **Catálogo Analisador da Qualidade da Energia Elétrica**. Porto Alegre, RS, 2015. Disponível em “<http://www.ims.ind.br>”. Acesso em: 02.01.2016.

JENSEN, A.; HARBO, A. la C. **Ripples in mathematics: The discrete wavelet transform**. New York: Springer Verlag, 2000. ISBN 3-540-41662-5.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, B.; ROBBA, E. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**. São Paulo: Editora EDGARD BLUCHER, 2005. ISBN 85-212-0355-1.

- KAGAN, N.; ROBBA, E. J.; SCHMIDT, H. P. **Estimação de indicadores de qualidade da energia elétrica**. São Paulo: Editora BLUCHER, 2009. ISBN 978-85-212-0487-9.
- KILTER, J.; MEYER, J.; HOWE, B.; ZAVODA, F.; TENTI, L.; MILANOVIĆ, J. V.; BOLLEN, M.; RIBEIRO, P. F.; DOYLE, P.; GORDON, J. M. R. Current practice and future challenges for power quality monitoring - CIGRE WG C4.112 Perspective. In: **IEEE PES. 15th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power**. Hong Kong, 2012.
- KRON. **Catálogo Analisador da Qualidade da Energia**. São Paulo, SP, 2011. Disponível em “<http://www.kron.com.br>”. Acesso em: 02.01.2016.
- LEIRIA, A.; NUNES, P.; MORCHED, A.; BARROS, M. T. C. Induction motor response to voltage dips. **Electric Power System Research**, 2006. v. 76, p. 676–680, May 2006.
- LI, X. R. **Probability, random signals and statistics: a textgraph with integrated software for electrical & computer engineers**. Boca Raton, FL: CRC Press, 1999. ISBN 0-8493-0433-4.
- LIEBERMAN, D. G.; TRONCOSO, R. J. R.; RIOS, R. A. O.; PEREZ, A. G.; YEPEZ, E. C. Techniques and methodologies for power quality analysis and disturbances classification in power systems: a review. **IET Generation, Transmission and Distribution**, 2011. IET, v. 5, n. 4, p. 519–529, 2011.
- LISOWIEC, A.; NOWAKOWSKI, A.; KOLODZIEJCZYK, Z. Integrating power quality analysis and protection relay functions. In: **ICREPQ’08. International Conference on Renewable Energies and Power Quality**. Córdoba, Spain, 2008.
- MADISETTI, V. K.; WILLIAMS, D. B. **The Digital Signal Processing Handbook**. Florida: CRC Press, 1998.
- MELO, M. O. B. C.; CAVALCANTI, G. Evaluation of the impacts of electric power quality costs in industrial production: Case studies in Northeast Brazil. In: **IEEE. 15th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power**. Hong Kong, China, 2012. p. 1–6.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C.; HUBELE, N. F. **Estatística aplicada à engenharia**. Washington, D.C.: LTC, 2012.
- MORENO-MUNOZ, A. **Power Quality - Mitigation Technologies in a Distributed Environment**. London: Springer-Verlag, 2007. ISBN 978-1-84628-771-8.
- MORETTIN, P. A. **Ondas e Ondaletas: Da Análise de Fourier à Análise de Ondaletas de Séries Temporais**. 2. ed. São Paulo: Edusp, 2014. ISBN 978-85-314-1478-7.
- MULTILIN, G. **239 Motor Protection Relay**. US, 2011. Disponível em “<http://www.GEMultilin.com>”. Acesso em: 19.02.2016.
- OLESKOVICZ, M.; COURRY, D.; CARNEIRO, A.; ARRUDA, E.; FILHO, O.; SOUZA, S. Estudo comparativo de ferramentas modernas de análise aplicadas à qualidade da energia elétrica. **Revista Controle e Automação**, 2006. v. 17, n. 3, p. 331–341, Julho, Agosto e Setembro 2006.

ORTIGUEIRA, M. D. **Processamento Digital de Sinais**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2005. ISBN 972-31-1134-9.

PALACIOS, R. H. C.; SILVA, I. N.; GOEDTEL, A.; GODOY, W. F.; OLESKOVICZ, M. The robust neural method to estimate torque in three-phase induction motor. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, 2014. p. 493–502, March 2014.

PARZEN, E. **Stochastic processes**. Philadelphia: SIAM - Society for Industrial and Applied Mathematics, 1999. ISBN 978-0-898714-41-8.

PEREIRA, F.; KAGAN, N. Utilização de medidores eletrônicos de faturamento para detecção e registro de eventos que afetam a qualidade de energia. **Revista Espaço Energia**, 2009. n. 10, Abril 2009. ISSN 1807-8575.

RODRIGUES, L. C. P. **Técnicas para a detecção, classificação e localização no tempo das variações de tensão de curta e longa duração**. Dissertação (Mestrado) — São Carlos - Universidade de São Paulo, 2008.

SANTOSO, S.; SABIN, D. D. Power quality data analytics: Tracking, Interpreting and Predicting Performance. In: IEEE PES. **IEEE PES General Meeting**. San Diego, CA, 2012. ISBN 978-1-4673-2728-2.

SCHAEEL, M.; SOURKOUNIS, C. Influences of power supply quality on electric equipment in production processes. In: IECON. **39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society**. Vienna, Austria, 2013. p. 2081–2086.

SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. **Microeletrônica**. 4. ed. São Paulo: MAKRON Books, 2000. ISBN 85-346-1044-4.

SEG. **MRM3-2 Motor Protection Relay**. Germany, 2008. Disponível em “<http://www.woodward-seg.com>”. Acesso em: 19.02.2016.

SIEMENS. **Motor Protection 7SK80**. Nuremberg, 2012. Disponível em “<http://www.siemens.com>”. Acesso em: 19.02.2016.

SILVA, N. I.; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. **Redes Neurais Artificiais para engenharia e ciências aplicadas**. São Paulo: Artliber Editora, 2010. ISBN 978-85-88098-53-4.

SMITH, S. W. **The Scientist and Engineer’s Guide to Digital Signal Processing**. 2nd. ed. San Diego, California: California Technical Publishing, 1999. ISBN 0-9660176-6-8.

STEVENSON, W. **Elementos de análise de sistemas de potência**. São Paulo: Editora McGraw-Hill do Brasil, 1978.

USIDA, W.; RODRIGUES, L.; OLESKOVICZ, M.; COURY, D. Análise qualitativa no monitoramento automático dos eventos de tensão de curta duração. **Revista Controle e Automação**, 2009. v. 20, n. 3, p. 323–334, Julho, Agosto e Setembro 2009.

WALKER, J. S. **A primer on wavelets and their scientific applications**. Washington, D.C.: Chapman & Hall (CRC), 1999.

WANG, Z.; WANG, X. Induction motor interactions after voltage sags. In: IEEE. **IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC)**. Halifax, NS, 2013.

ZHANG, P.; DU, Y.; HABETLER, T. G.; LU, B. A survey of condition monitoring and protection methods for medium-voltage induction motors. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2011. IEEE, v. 47, n. 1, p. 34–46, January/February 2011.

Apêndices

Simulações Executadas

A seguir serão apresentados os resultados das simulações no SEI e saídas gráficas que procuram validar o modelo do MIT através da simulação em vazio durante a partida, com carga, e em regime permanente senoidal.

A Figura 94 traz o diagrama simplificado do SEI com os resultados da simulação após o cálculo do fluxo de potência. Para os barramentos destacados, tem-se os valores das tensões e do ângulo de fase. Já para os equipamentos são apresentados as potências ativas e reativas, bem como as porcentagens de carregamento.

Figura 94: Diagrama representando o SEI com os resultados após o cálculo do fluxo de potência.

A.1 Partida do Motor 1

Inicialmente, o Motor 1 foi modelado no SEI e foram efetuados testes de partida em vazio, garantindo a consistência dos resultados conforme pode ser verificado pelos gráficos do torque eletromagnético (Figura 95 (a)) e velocidade (Figura 95 (b)) em função do tempo.

Figura 95: Torque eletromagnético (a), e velocidade (b), em função do tempo no barramento BMTM durante a partida do Motor 1.

Para efeito de ilustração, apresenta-se na Figura 96 a tensão de alimentação por fase no barramento BMTM durante a partida do Motor 1.

Após a modelagem do Motor 1, prosseguiu-se com as simulações aplicadas sobre o SEI para caracterizar situações representativas de problemas relacionados à QEE.

Figura 96: Tensão de alimentação no barramento BMTM durante a partida do Motor 1.

A.2 Situações de Falhas aplicadas sobre o SEI

Neste item serão apresentadas e discutidas as formas de ondas das tensões, correntes, potências, torque eletromagnético e de velocidade em algumas das situações de falhas aplicadas nos barramentos B2/BMT e B3/BMTM, sendo estes dados monitorados no barramento do Motor 1. Os gráficos ilustram o comportamento do Motor 1 quando das falhas aplicadas em pontos do SEI que evidenciaram, sobre o mesmo, casos de VTCDs.

No primeiro caso, uma interrupção de tensão (com tensão remanescente de 0 p.u.) foi provocada por uma falta trifásica a terra (ABCT) no barramento B3/BMTM no instante de 1 segundo, com duração de 1 segundo. Tal situação busca verificar o comportamento do motor de indução em ocorrências de falhas no sistema de distribuição através da análise dos valores eficazes das tensões e correntes.

A Figura 97 apresenta o nível de tensão nos terminais de alimentação do Motor 1, e a Figura 98 o nível de corrente e de potência, sendo evidenciada a severidade da falta trifásica.

Figura 97: Variação das tensões do Motor 1 no barramento B3/BMTM.

Figura 98: Variação das correntes (a), e potências (b), do Motor 1, no barramento B3/BMTM.

A Figura 99 apresenta a variação do torque eletromagnético (a) e o decréscimo de 57% da velocidade (b), devido ao afundamento nas tensões das fases, levando a um aumento da corrente absorvida da rede (próximo de 5,3 p.u.), pois tal magnitude se assemelha à corrente de partida da máquina, levando o motor a uma condição de sobrecorrente, podendo desligar a máquina dependendo do ajuste da proteção associada.

Conforme pode ser observado pela Figura 99 (a) e (b), após a eliminação da falta e recuperação da tensão, o motor de indução retoma o torque eletromagnético e aceleração nominal.

Em outra situação, foi aplicada uma falta assimétrica envolvendo as fases "A" e "B" (AB) no barramento B2/BMT. Através da Figura 100 é verificado um afundamento de tensão momentâneo caracterizado pelo desbalanceamento entre as fases no Motor 1, provocando um decréscimo de aproximadamente 21% da sua velocidade nominal. A Fi-

Figura 99: Variação do torque eletromagnético (a), e da velocidade (b), do Motor 1, no barramento B3/BMTM.

gura 101 caracteriza, respectivamente, as correntes (a), e potências (b) registradas no Motor 1 frente à situação experimentada.

Conforme pode ser observado, mediante tal situação, as correntes aumentaram consideravelmente em relação à corrente nominal, podendo nestas intensidades e tempos, atuar a proteção do motor dependendo do ajuste da proteção associada.

A Figura 102 (a) ilustra a intensidade do torque eletromagnético durante o período da falta aplicada, retornando ao regime após a eliminação da mesma. A Figura 102 (b) retrata a velocidade no Motor 1 para a mesma situação apontada.

Figura 100: Variação das tensões no Motor 1 para 1 segundo do afundamento manifestado no barramento B2/BMT.

Figura 101: Variação das correntes (a), e das potências (b), no Motor 1, para 1 segundo do afundamento manifestado no barramento B2/BMT.

(a)

(b)

Figura 102: Variação do torque eletromagnético (a), e da velocidade (b), do Motor 1, no barramento BMT.

APÊNDICE B

Tabelas

A seguir serão apresentadas as tabelas contendo os resultados obtidos para a correlação cruzada entre os sinais dos barramentos B3/BMTM com os barramentos B1/BAT e B2/BMT.

Tabela 42: Valores máximos da correlação cruzada do barramento BAT para falta trifásica.

Falta trifásica			
BAT			
<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,003	0,004	0,002	90°
0,001	0,001	0,002	45°
0,000	0,000	0,003	0°
Limiares de classificação			
0,000-0,003	0,000-0,004	0,000-0,003	
A			
0,113-0,131			

Tabela 43: Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMT para falta trifásica.

Falta trifásica			
BMT			
<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,006	0,003	0,000	90°
0,000	0,003	0,002	45°
0,000	0,006	0,006	0°
Limiares de classificação			
0,000-0,007	0,000-0,007	0,000-0,007	
C			
0,090-0,110			

Tabela 44: Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMTM para falta trifásica.

Falta trifásica			
BMTM			
<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,007	0,004	0,004	90°
0,004	0,007	0,004	45°
0,000	0,007	0,006	0°
Limiares de classificação			
0,000-0,008	0,000-0,008	0,003-0,007	
A			
0,000-0,010			

Tabela 45: Valores máximos da correlação cruzada do barramento BAT para falta AB.

Falta AB			
BAT			
<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,243	0,115	0,276	90°
0,237	0,101	0,278	45°
0,236	0,101	0,274	0°
Limiares de classificação			
0,23-0,25	0,10-0,12	0,27-0,28	
B			
0,39-0,40			

Tabela 46: Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMT para falta AB.

Falta AB			
BMT			
<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,205	0,029	0,426	90°
0,196	0,028	0,432	45°
0,194	0,026	0,431	0°
Limiares de classificação			
0,19-0,21	0,02-0,03	0,42-0,44	
B			
0,11-0,13			

Tabela 47: Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMTM para falta AB.

Falta AB			
BMTM			
<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,239	0,240	0,375	90°
0,194	0,242	0,462	45°
0,193	0,241	0,434	0°
Limiares de classificação			
0,19-0,24	0,23-0,25	0,37-0,47	
A			
0,47-0,48			

Tabela 48: Valores máximos da correlação cruzada do barramento BAT para falta BC.

Falta BC			
BAT			
<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,276	0,243	0,115	90°
0,274	0,235	0,101	0°
Limiares de classificação			
0,27-0,28	0,23-0,25	0,10-0,12	
C			
0,39-0,40			

Tabela 49: Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMT para falta BC.

Falta BC			
BMT			
<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,426	0,202	0,029	90°
0,431	0,194	0,027	0°
Limiares de classificação			
0,42-0,44	0,19-0,21	0,02-0,03	
C			
0,11-0,13			

Tabela 50: Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMTM para falta BC.

Falta BC			
BMTM			
<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,388	0,237	0,239	90°
0,435	0,193	0,240	0°
Limiares de classificação			
0,37-0,47	0,19-0,24	0,23-0,25	
B			
0,47-0,48			

Tabela 51: Valores máximos da correlação cruzada do barramento BAT para falta CA.

Falta CA			
BAT			
<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,114	0,276	0,242	90°
0,101	0,274	0,235	0°
Limiares de classificação			
0,10-0,12	0,27-0,28	0,23-0,25	
A			
0,39-0,40			

Tabela 52: Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMT para falta CA.

Falta CA			
BMT			
<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,029	0,426	0,202	90°
0,026	0,431	0,194	0°
Limiares de classificação			
0,02-0,03	0,42-0,44	0,19-0,21	
A			
0,11-0,13			

Tabela 53: Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMTM para falta CA.

Falta CA			
BMTM			
<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,240	0,372	0,239	90°
0,240	0,436	0,193	0°
Limiares de classificação			
0,23-0,25	0,37-0,47	0,19-0,24	
C			
0,47-0,48			

Tabela 54: Valores máximos da correlação cruzada do barramento BAT para falta AB-T.

Falta AB-T			
BAT			
<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,007	0,004	0,322	90°
0,002	0,001	0,324	45°
0,000	0,000	0,321	0°
Limiares de classificação			
0,000-0,007	0,000-0,004	0,32-0,33	
B			
0,345-0,348			

Tabela 55: Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMT para falta AB-T.

Falta AB-T			
BMT			
<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,006	0,003	0,634	90°
0,002	0,003	0,643	45°
0,000	0,003	0,636	0°
Limiares de classificação			
0,000-0,007	0,000-0,004	0,63-0,65	
B			
0,111-0,121			

Tabela 56: Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMTM para falta AB-T.

Falta AB-T			
BMTM			
<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,007	0,004	0,364	90°
0,004	0,008	0,452	45°
0,000	0,007	0,428	0°
Limiares de classificação			
0,000-0,008	0,000-0,008	0,36-0,46	
A			
0,000-0,010			

Tabela 57: Valores máximos da correlação cruzada do barramento BAT para falta BC-T.

Falta BC-T			
BAT			
<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,321	0,007	0,004	90°
0,321	0,000	0,003	0°
Limiares de classificação			
0,32-0,33	0,000-0,007	0,000-0,004	
C			
0,345-0,348			

Tabela 58: Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMT para falta BC-T.

Falta BC-T			
BMT			
<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,635	0,003	0,002	90°
0,632	0,000	0,003	0°
Limiares de classificação			
0,63-0,65	0,000-0,004	0,000-0,004	
C			
0,111-0,121			

Tabela 59: Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMTM para falta BC-T.

Falta BC-T			
BMTM			
<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,378	0,004	0,002	90°
0,430	0,000	0,003	0°
Limiares de classificação			
0,36-0,46	0,000-0,008	0,003-0,008	
B			
0,000-0,010			

Tabela 60: Valores máximos da correlação cruzada do barramento BAT para falta CA-T.

Falta CA-T			
BAT			
<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,002	0,321	0,003	90°
0,003	0,321	0,000	0°
Limiares de classificação			
0,000-0,004	0,32-0,33	0,000-0,007	
A			
0,345-0,348			

Tabela 61: Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMT para falta CA-T.

Falta CA-T			
BMT			
<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,002	0,635	0,003	90°
0,003	0,636	0,000	0°
Limiares de classificação			
0,000-0,004	0,63-0,65	0,000-0,007	
A			
0,111-0,121			

Tabela 62: Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMTM para falta CA-T.

Falta CA-T			
BMTM			
<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,004	0,361	0,007	90°
0,003	0,431	0,000	0°
Limiares de classificação			
0,000-0,008	0,36-0,46	0,000-0,008	
C			
0,000-0,010			

Tabela 63: Valores máximos da correlação cruzada do barramento BAT para falta A-T.

Falta A-T			
BAT			
<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,007	0,338	0,549	90°
0,002	0,365	0,449	45°
0,000	0,403	0,510	0°
Limiares de classificação			
0,000-0,007	0,33-0,41	0,44-0,56	
B			
0,62-0,64			

Tabela 64: Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMT para falta A-T.

Falta A-T			
BMT			
<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,008	0,750	0,761	90°
0,000	0,765	0,760	45°
0,000	0,776	0,650	0°
Limiares de classificação			
0,000-0,008	0,749-0,780	0,649-0,762	
B			
0,90-0,92			

Tabela 65: Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMTM para falta A-T.

Falta A-T			
BMTM			
<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,008	0,487	0,354	90°
0,004	0,392	0,430	45°
0,000	0,465	0,402	0°
Limiares de classificação			
0,000-0,010	0,39-0,49	0,35-0,43	
A			
0,000-0,010			

Tabela 66: Valores máximos da correlação cruzada do barramento BAT para falta B-T.

Falta B-T			
BAT			
<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,549	0,007	0,339	90°
0,509	0,000	0,402	0°
Limiares de classificação			
0,44-0,56	0,001-0,007	0,33-0,41	
C			
0,62-0,64			

Tabela 67: Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMT para falta B-T.

Falta B-T			
BMT			
<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,762	0,004	0,753	90°
0,650	0,000	0,776	0°
Limiares de classificação			
0,649-0,762	0,000-0,008	0,749-0,780	
B			
0,90-0,92			

Tabela 68: Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMTM para falta B-T.

Falta B-T			
BMTM			
<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,367	0,004	0,484	90°
0,405	0,000	0,425	0°
Limiares de classificação			
0,35-0,43	0,000-0,010	0,39-0,49	
B			
0,000-0,010			

Tabela 69: Valores máximos da correlação cruzada do barramento BAT para falta C-T.

Falta C-T			
BAT			
<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,340	0,549	0,003	90°
0,402	0,509	0,000	0°
Limiares de classificação			
0,33-0,41	0,44-0,56	0,001-0,007	
A			
0,62-0,64			

Tabela 70: Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMT para falta C-T.

Falta C-T			
BMT			
<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,753	0,759	0,004	90°
0,777	0,654	0,000	0°
Limiares de classificação			
0,749-0,780	0,649-0,762	0,000-0,008	
A			
0,90-0,92			

Tabela 71: Valores máximos da correlação cruzada do barramento BMTM para falta C-T.

Falta C-T			
BMTM			
<i>Fase A</i>	<i>Fase B</i>	<i>Fase C</i>	Ângulo de incidência
0,487	0,351	0,008	90°
0,425	0,406	0,000	0°
Limiares de classificação			
0,39-0,49	0,35-0,43	0,000-0,010	
C			
0,000-0,010			

A seguir serão apresentadas as tabelas contendo os resultados dos índices de erro obtidos para o treinamento e validação das RNAs.

Tabela 72: Índices de erro referentes à validação do torque eletromagnético.

Resultados obtidos para a validação - torque eletromagnético					
Tipo de Distúrbio	Ângulo de Incidência	Barramento	MAPE (%)	MSE (p.u.)	Desvio Padrão (p.u.)
A-T	33°	BMTM	4,91	$2,13e^{-3}$	$4,33e^{-2}$
A-T	73°	BMT	$6,60e^{-1}$	$9,71e^{-5}$	$9,59e^{-3}$
B-T	87°	BMTM	$2,35e^1$	$4,68e^{-2}$	$2,13e^{-1}$
B-T	85°	BMT	1,58	$9,06e^{-4}$	$3,00e^{-2}$
C-T	57°	BMTM	$2,39e^1$	$4,17e^{-1}$	$1,92e^{-1}$
AB-T	33°	BMTM	$3,57e^1$	$3,25e^{-2}$	$1,68e^{-1}$
AB-T	73°	BMT	$2,94e^1$	$5,26e^{-2}$	$2,18e^{-1}$
BC-T	87°	BMTM	$5,99e^1$	$4,83e^{-1}$	$6,20e^{-1}$
BC-T	85°	BMT	$2,45e^2$	2,92	1,68
CA-T	57°	BMTM	$4,36e^1$	$1,21e^{-1}$	$3,48e^{-1}$
CA-T	10°	BMT	$2,08e^1$	$2,36e^{-2}$	$1,46e^{-1}$
AB	33°	BMTM	$1,73e^1$	$4,66e^{-2}$	$2,06e^{-1}$
AB	73°	BMT	$2,91e^1$	$1,93e^{-2}$	$1,39e^{-1}$
BC	87°	BMTM	$1,11e^2$	$6,90e^{-2}$	$2,60e^{-1}$
BC	85°	BMT	$1,13e^1$	$8,07e^{-3}$	$9,00e^{-2}$
CA	57°	BMTM	$2,85e^1$	$2,51e^{-2}$	$1,30e^{-1}$
CA	10°	BMT	$4,79e^1$	$1,05e^{-1}$	$3,24e^{-1}$
ABC	33°	BMTM	3,81	$8,26e^{-3}$	$9,06e^{-2}$
ABC	73°	BMT	7,50	$9,06e^{-2}$	$2,85e^{-1}$

Tabela 73: Índices de erro referentes à validação da velocidade.

Resultados obtidos para a validação - velocidade					
Tipo de Distúrbio	Ângulo de Incidência	Barramento	MAPE (%)	MSE (p.u.)	Desvio Padrão (p.u.)
A-T	33°	BMTM	$1,29e^{-1}$	$6,47e^{-6}$	$2,24e^{-3}$
A-T	73°	BMT	$1,22e^{-2}$	$1,97e^{-8}$	$1,10e^{-4}$
B-T	87°	BMTM	$9,81e^{-1}$	$1,08e^{-4}$	$1,04e^{-2}$
B-T	85°	BMT	$3,57e^{-2}$	$2,07e^{-7}$	$4,50e^{-4}$
C-T	57°	BMTM	$4,49e^{-1}$	$5,16e^{-5}$	$6,64e^{-3}$
AB-T	33°	BMTM	$1,96e^{-1}$	$1,01e^{-5}$	$3,18e^{-3}$
AB-T	73°	BMT	$5,73e^{-1}$	$8,20e^{-5}$	$8,63e^{-3}$
BC-T	87°	BMTM	1,34	$3,73e^{-4}$	$1,45e^{-2}$
BC-T	85°	BMT	$5,83e^{-1}$	$4,68e^{-5}$	$6,78e^{-3}$
CA-T	57°	BMTM	1,10	$3,51e^{-4}$	$1,60e^{-2}$
CA-T	10°	BMT	$3,22e^{-1}$	$2,58e^{-5}$	$4,58e^{-3}$
AB	33°	BMTM	$7,68e^{-1}$	$1,95e^{-4}$	$1,18e^{-2}$
AB	73°	BMT	1,43	$5,91e^{-4}$	$1,99e^{-2}$
BC	87°	BMTM	1,25	$4,69e^{-4}$	$1,85e^{-2}$
BC	85°	BMT	$1,97e^{-1}$	$8,36e^{-6}$	$2,87e^{-3}$
CA	57°	BMTM	1,39	$3,46e^{-4}$	$1,27e^{-2}$
CA	10°	BMT	$5,69e^{-1}$	$5,43e^{-5}$	$4,87e^{-3}$
ABC	33°	BMTM	$6,00e^{-1}$	$1,45e^{-4}$	$1,18e^{-2}$
ABC	73°	BMT	$3,41e^{-1}$	$3,50e^{-5}$	$5,89e^{-3}$

Tabela 74: Índices de erro referentes ao treinamento do torque eletromagnético.

Resultados obtidos para o treinamento - torque eletromagnético					
Tipo de Distúrbio	Ângulo de Incidência	Barramento	MAPE (%)	MSE (p.u.)	Desvio Padrão (p.u.)
A-T	0° e 90°	BAT, BMT e BMTM	$3,58e^{-1}$	$2,70e^{-7}$	$5,22e^{-4}$
B-T	0° e 90°	BAT, BMT e BMTM	$7,41e^{-2}$	$3,38e^{-7}$	$5,77e^{-4}$
C-T	0° e 90°	BAT, BMT e BMTM	$7,41e^{-1}$	$6,15e^{-3}$	$7,84e^{-2}$
AB-T	0° e 90°	BAT, BMT e BMTM	$8,51e^{-2}$	$8,02e^{-7}$	$8,97e^{-4}$
BC-T	0° e 90°	BAT, BMT e BMTM	$4,36e^{-1}$	$1,59e^{-5}$	$4,00e^{-3}$
CA-T	0° e 90°	BAT, BMT e BMTM	$3,38e^{-1}$	$9,96e^{-4}$	$3,16e^{-2}$
AB	0° e 90°	BAT, BMT e BMTM	$2,03e^{-1}$	$1,56e^{-5}$	$3,95e^{-3}$
BC	0° e 90°	BAT, BMT e BMTM	$5,52e^{-1}$	$6,70e^{-4}$	$2,58e^{-2}$
CA	0° e 90°	BAT, BMT e BMTM	$3,30e^{-1}$	$2,33e^{-4}$	$1,53e^{-2}$
ABC	0° e 90°	BAT, BMT e BMTM	2,31	$2,39e^{-2}$	$1,54e^{-1}$

Tabela 75: Índices de erro referentes ao treinamento da velocidade.

Resultados obtidos para o treinamento - velocidade					
Tipo de Distúrbio	Ângulo de Incidência	Barramento	MAPE (%)	MSE (p.u.)	Desvio Padrão (p.u.)
A-T	0° e 90°	BAT, BMT e BMTM	$3,52e^{-3}$	$2,83e^{-9}$	$5,32e^{-5}$
B-T	0° e 90°	BAT, BMT e BMTM	$1,01e^{-2}$	$1,77e^{-8}$	$1,33e^{-4}$
C-T	0° e 90°	BAT, BMT e BMTM	$2,23e^{-3}$	$8,07e^{-10}$	$2,85e^{-5}$
AB-T	0° e 90°	BAT, BMT e BMTM	$5,55e^{-3}$	$7,10e^{-8}$	$2,66e^{-4}$
BC-T	0° e 90°	BAT, BMT e BMTM	$7,08e^{-3}$	$1,17e^{-7}$	$3,41e^{-4}$
CA-T	0° e 90°	BAT, BMT e BMTM	$3,07e^{-3}$	$3,79e^{-9}$	$6,17e^{-5}$
AB	0° e 90°	BAT, BMT e BMTM	$1,81e^{-2}$	$1,01e^{-7}$	$3,16e^{-4}$
BC	0° e 90°	BAT, BMT e BMTM	$5,09e^{-3}$	$5,10e^{-9}$	$7,09e^{-5}$
CA	0° e 90°	BAT, BMT e BMTM	$3,82e^{-2}$	$6,01e^{-6}$	$2,46e^{-3}$
ABC	0° e 90°	BAT, BMT e BMTM	1,48	$6,09e^{-3}$	$7,81e^{-2}$

Divulgação da pesquisa

Em relação à divulgação da pesquisa realizada, este apêndice apresenta a relação das publicações alcançadas.

Trabalhos completos publicados em anais e congressos:

GIBELLI, G. B. ; OLESKOVICZ, M. ; VIEIRA, J. C. M. . Power Quality Analysis in an Industrial Electrical System by Probability Density Function. In: International Conference on Renewable Energies and Power Quality - ICREPQ'16, 2016, Madrid. International Conference on Renewable Energies and Power Quality - ICREPQ'16, 2016. p. 1-6.

GIBELLI, G. B. ; OLESKOVICZ, M. ; VIEIRA JR., J. C. M. . Análise da QEE de um sistema elétrico de potência industrial através da aplicação da função densidade de probabilidade. In: 11th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE2015, 2015, São José dos Campos. 11th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission - CLAGTEE2015, 2015. p. 1-8.

GIBELLI, G. B. ; OLESKOVICZ, M. ; VIEIRA JR., J. C. M. . Aplicação da Função Densidade de Probabilidade para Análise da QEE em um Sistema Elétrico de Potência Industrial. In: XI Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica - CBQEE2015, 2015, Campina Grande. XI Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, 2015. p. 1-6.

Artigos completos publicados em periódicos:

GIBELLI, G. B. ; OLESKOVICZ, M. ; VIEIRA, J. C. M. . Power Quality Analysis in an Industrial Electrical System by Probability Density Function. In: Renewable Energy and Power Quality Journal - RE&PQJ, 2016, Madrid. Renewable Energy and Power

Quality Journal - RE&PQJ, 2016. p. 1-6.