UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FERNANDO PARRA DOS ANJOS LIMA

ANÁLISE DE DISTÚRBIOS DE TENSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA BASEADA EM SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS

Ilha Solteira
2013

FERNANDO PARRA DOS ANJOS LIMA

Orientando

ANÁLISE DE DISTÚRBIOS DE TENSÃO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA BASEADA EM SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS

Dissertação apresentado à Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica
Área de Conhecimento: Automação

CARLOS ROBERTO MINUSSI

Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

L732a

Lima, Fernando Parra dos Anjos.
Análise de distúrbios de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica baseada em sistemas imunológicos artificiais / Fernando Parra dos Anjos Lima. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2013
169 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2013

Orientador: Carlos Roberto Minussi
Inclui bibliografia

1. Diagnóstico. 2. Distúrbios de tensão. 3. Sistemas de distribuição de energia elétrica. 4. Sistemas imunológicos artificiais. 5. Algoritmo de seleção negativa. 6. Sistemas inteligentes.

unesp **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: Análise de Distúrbios de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica baseada em sistemas imunológicos artificiais

AUTOR: FERNANDO PARRA DOS ANJOS LIMA

ORIENTADOR: Prof. Dr. CARLOS ROBERTO MINUSSI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica , Área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. CARLOS ROBERTO MINUSSI
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Profa. Dra. MARA LÚCIA MARTINS LOPES
Departamento de Matemática / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. FABRÍCIO OLIVETTI DE FRANÇA
Centro de Matemática, Computação e Cognição / Universidade Federal do Abc

Data da realização: 20 de março de 2013.

DEDICO

Aos meus pais **José dos Anjos Lima** e **Iris Matilde Parra Vicente dos Anjos** pelo incentivo, motivação e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

À minha irmã **Amanda Parra dos Anjos Lima** por toda ajuda e incentivo.

À minha namorada **Simone Silva Frutuoso de Souza** por todo amor, compreensão e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me concedido o dom da vida, conhecimento, força, persistência, objetividade e fé para eu não desistir, e para que eu conseguisse alcançar meus objetivos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Roberto Minussi, agradeço pela atenção, dedicação, empenho, e pelas contribuições na minha formação acadêmica, profissional e pessoal. Agradeço pelo apoio, direcionamento e orientação nos trabalhos realizados, onde tive um grande aprendizado, vivência e experiência. Agradeço pelo grande amigo e pai que se mostra, sempre com as indicações corretas nos momentos necessários, com incentivos motivadores a cada vitória, e em cada tropeço.

Aos meus pais, José dos Anjos Lima e Iris Matilde Parra Vicente dos Anjos Lima, que sempre estiveram ao meu lado dando total apoio e incentivo em minha busca pela realização de meus sonhos. À minha irmã, Amanda Parra dos Anjos Lima, pelo carinho e apoio. À minha namorada e amiga Simone Silva Frutuoso de Souza, pelo amor, incentivo, paciência e compreensão.

Agradeço a Prof[a]. Dra. Mara Lúcia Martins Lopes por toda contribuição, ideias, orientação e ajuda para o desenvolvimento desta pesquisa, bem como outros trabalhos. Agradeço pela confiança, pela amizade, pelo companheirismo e por toda atenção. Agradeço por auxiliar em minha formação acadêmica, profissional e pessoal.

Agradeço a Prof[a]. Dra. Anna Diva Plasencia Lotufo por acompanhar meus trabalhos, contribuindo com toda sua experiência, apoio, orientação e direcionamento para conclusão desta pesquisa, bem como outros trabalhos. Agradeço por auxiliar em minha formação acadêmica, profissional e pessoal. Agradeço por todo auxilio, confiança, amizade, e toda atenção.

Agradeço aos professores (as) que participaram das bancas de qualificação e defesa, onde contribuíram com ideias, sugestões e melhorias para este trabalho. Em especial agradeço a Prof[a]. Dr. Mara Lúcia Martins Lopes, a Prof[a]. Dr. Anna Diva Plasencia Lotufo e ao prof. Dr. Fabrício Olivetti de França.

Agradeço em especial alguns familiares que sempre torceram e me apoiaram, entre eles agradeço José Carlos Frutuoso de Souza, Santina Pereira da Silva Souza, José Rodrigo

Silva Frutuoso de Souza, Ricardo Silva Frutuoso de Souza, Diego Silva Frutuoso de Souza e Paulo Sérgio Narciso.

A todos os meus amigos que sempre estiveram ao meu lado. Em especial, a Adriano dos Santos e Souza, James Clauton da Silva, Mauro Tonelli Neto, Ana Cláudia Barros, David Alvarez Martinez, João Luiz Bergamo Zamperin, Caio Cesar Enside de Abreu, Elson Batista Puger, Ueslei Barbosa Fernandes, Donizete Ritter, Eliane Silva de Souza, Rafael Araujo Lima, Danilo Damasseno Sabino, Rafael Marcelino de Jesus, Miriam Regina Bordinhon Pegorari, Vanderlei Watanabe de Almeida e Marcio Leandro Barbosa da Silveira pela força, apoio e amizade verdadeira.

Agradeço a todos os companheiros e amigos do laboratório de pesquisa SINTEL – Sistemas Inteligentes.

Agradeço aos Professores do PPGEE da UNESP-Ilha Solteira, em especial, Carlos Roberto Minussi, Anna Diva Plasencia Lotufo, Rubén Augusto Romero Lázaro, Marcos Júlio Rider Flores, Francisco Villarreal Alvarado, Jozué Vieira Filho, pela paciência, amizade, ajuda e incentivo durante a realização das disciplinas cursadas no Mestrado.

Agradeço aos Professores do UniSALESIANO-Araçatuba, em especial, Alexandre Marcelino da Silva, Maria Teixeira, Pedro Pereira de Souza, Giuliano Pierre Estevam, Amadeu Zanon Neto, Carlos Eduardo Zambon, Getúlio Teruo Tateoki e Nelson Hitoshi Takiy pelo apoio, amizade, ajuda e incentivo para dar sequência na minha carreira acadêmica.

Agradeço à CAPES e ao CNPq pelo auxílio financeiro concedido, através de bolsas de estudos de Mestrado, que permitiu que eu pudesse me dedicar exclusivamente ao desenvolvimento desta pesquisa.

“Tente uma, duas, três vezes e se possível tente a quarta, a quinta e quantas vezes for necessário. Só não desista nas primeiras tentativas, a persistência é amiga da conquista. Se você quer chegar onde a maioria não chega, faça o que a maioria não faz..” **Bill Gates.**

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se um método para detecção e classificação de distúrbios de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica. A partir das oscilografias de tensão, medidas na subestação, aplica-se o algoritmo de seleção negativa de um sistema imunológico artificial para diferenciar os sinais entre próprios e não-próprios. Os sinais classificados como próprios representam a operação normal do sistema, isto é, alimentador sem a presença de distúrbio, e os classificados como não-próprios são sinais onde há a presença de uma anormalidade. A análise dos sinais é realizada através do janelamento das oscilografias onde são realizadas comparações entre os sinais e os detectores previamente criados, avaliando a afinidade entre as janelas. Caso a afinidade entre os sinais ultrapasse um limiar preestabelecido pelo operador, é encontrado um casamento, e o sinal é classificado. Com esta proposta busca-se a concepção de um método que possa ser modificado facilmente, para atender a permanente evolução das tecnologias das subestações. Para validar e avaliar o desempenho do método foram realizados testes com quatro sistemas de distribuição de energia elétrica, sendo três sistemas testes de 5, 33 e 84 barras e um sistema real de 134 barras.

Palavras-Chave- Diagnóstico. Distúrbios de tensão. Sistemas de distribuição de energia elétrica. Sistemas imunológicos artificiais. Algoritmo de seleção negativa. Sistemas inteligentes.

ABSTRACT

This work presents a method to detect and classify voltage disturbances in electrical distribution systems. The Negative Selection Algorithm of an artificial immunological system is applied to the voltage oscillographs, measured on the substation, to distinguish the signals as self or nonself. The signals classified as self represent the normal operation of the system, i.e. the feeder without disturbance, and those classified as nonself are the signals where there are some abnormalities. The signal analysis is performed by windowing the oscillographs comparing the signals and the detectors previously created, evaluating the affinity with the windows. If the affinity with the signals overpasses a predefined limit a matching is found and the signal is classified. This proposal is a method that can be easily modified to attend the fast evolution of the substation technologies. To validate the performance tests were done to four different distribution systems, including one real system.

Keywords- Diagnosis. Voltage disturbances. Electrical Distribution Systems. Artificial immune systems. Negative Selection Algorithm. Intelligent Systems.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de um distúrbio harmônico presente na fase A do sistema. 29

Figura 2 - Exemplo de um transitório oscilatório presente na fase A do sistema. 30

Figura 3 - Exemplo de um distúrbio *swell* presente na fase A do sistema. 31

Figura 4 - Exemplo de um distúrbio *sag* presente na fase A do sistema. 32

Figura 5 - Exemplo de um distúrbio *outage* presente na fase A do sistema. 33

Figura 6 - Exemplo de um distúrbio *swell*-harmônico presente na fase A do sistema. 34

Figura 7 - Exemplo de um distúrbio *sag*-harmônico presente na fase A do sistema. 35

Figura 8 - Estrutura da computação natural. 49

Figura 9 – Camadas de defesa do sistema imunológico biológico. 51

Figura 10 - Fluxograma da fase de censoriamento do ASN. 59

Figura 11 - Fluxograma da fase de monitoramento do ASN. 59

Figura 12 – Diagrama de módulos da fase de censoriamento. 66

Figura 13 – Fluxograma da fase de censoriamento. 68

Figura 14 – Diagrama de módulos da fase de monitoramento. 69

Figura 15 – Módulo de detecção próprio/não-próprio. 70

Figura 16 – Fluxograma da fase de monitoramento. 73

Figura 17 – Oscilografia do sistema em operação normal. 74

Figura 18 – Detector próprio fase A. 75

Figura 19 – Oscilografia do sistema sobre efeito do distúrbio harmônico. 75

Figura 20 – Análise do sinal harmônico para gerar o detector. 76

Figura 21 – Terceiro ciclo da análise do sinal harmônico. 77

Figura 22 – Detector harmônico fase A. 77

Figura 23 – Oscilografia a ser monitorada pelo sistema. 78

Figura 24 – Ciclo 1 do sinal analisado. 78

Figura 25 – Ciclo 2 do sinal analisado. 79

Figura 26 – Ciclo 3 do sinal analisado. 80

Figura 27 – Análise realizada pelo módulo de classificação. 80

Figura 28 – Gráfico de acertos para cada sistema. 91

Figura 29 – Erro de classificação. 97

Figura A1 - Anatomia do sistema imunológico biológico. 122

Figura D1 – Alimentador de energia elétrica de 5 barras. 134

Figura D2 – Alimentador de energia elétrica de 33 barras. 136

Figura D3 – Alimentador de energia elétrica de 84 barras. 139

Figura D4 – Alimentador de energia elétrica de 84 barras. 144

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Equações e parâmetros do modelo teórico. 45

Tabela 2 – Quantidade de simulações realizadas para cada sistema. 46

Tabela 3 – Codificação da saída próprio/não-próprio. 70

Tabela 4 – Codificação da saída do módulo de classificação. 72

Tabela 5 – Quantidade máxima de detectores. 83

Tabela 6 – Resultados do teste I, considerando ε = 3%. 85

Tabela 7 – Resultados do teste I, considerando ε = 5%. 86

Tabela 8 – Tempo de processamento para o teste I. 87

Tabela 9 – Conjunto de detectores teste II. 87

Tabela 10 – Resultados do teste II, para o conjunto de detectores A. 88

Tabela 11 – Resultados do teste II, para o conjunto de detectores B. 88

Tabela 12 – Resultados do teste II, para o conjunto de detectores C. 89

Tabela 13 – Resultados do teste II, para o conjunto de detectores D. 89

Tabela 14 – Resultados do teste II, para o conjunto de detectores E. 90

Tabela 15 – Tempo de processamento para o teste II. 92

Tabela 16 – Resultados do teste III, para a taxa de afinidade A. 93

Tabela 17 – Resultados do teste III, para a taxa de afinidade B. 93

Tabela 18 – Resultados do teste III, para a taxa de afinidade C. 94

Tabela 19 – Tempo de processamento para o teste III. 94

Tabela 20 – Melhor resultado encontrado. 95

Tabela 21 – Estudo comparativo. 98

Tabela D1 – Dados das barras do sistema de 5 barras. 134

Tabela D2 – Dados dos circuitos do sistema de 5 barras. 135

Tabela D3 – Dados das barras do sistema de 33 barras. 136

Tabela D4 – Dados dos circuitos do sistema de 33 barras. 137

Tabela D5 – Dados das barras do sistema de 84 barras. 139

Tabela D6 – Dados dos circuitos do sistema de 84 barras. 142

Tabela D7 – Dados do sistema de 134 barras. 144

Tabela E1 – Resultados para o desvio de 3% - sistema de 5 barras. 149

Tabela E2 – Resultados para o desvio de 3% - sistema de 33 barras. 150

Tabela E3 – Resultados para o desvio de 3% - sistema de 84 barras. 150

Tabela E4 – Resultados para o desvio de 3% - sistema de 134 barras. 151

Tabela E5 – Resultados para o desvio de 5% - sistema de 5 barras. 151

Tabela E6 – Resultados para o desvio de 5% - sistema de 33 barras. 152

Tabela E7 – Resultados para o desvio de 5% - sistema de 84 barras. 152

Tabela E8 – Resultados para o desvio de 5% - sistema de 134 barras. 153

Tabela E9 – Resultados para o conjunto de detectores A - sistema de 5 barras. 153

Tabela E10 – Resultados para o conjunto de detectores A - sistema de 33 barras. 154

Tabela E 11 – Resultados para o conjunto de detectores A - sistema de 84 barras. 154

Tabela E12 – Resultados para o conjunto de detectores A - sistema de 134 barras. 155

Tabela E13 – Resultados para o conjunto de detectores B - sistema de 5 barras. 155

Tabela E14 – Resultados para o conjunto de detectores B - sistema de 33 barras. 156

Tabela E15 – Resultados para o conjunto de detectores B - sistema de 84 barras. 156

Tabela E16 – Resultados para o conjunto de detectores B - sistema de 134 barras. 157

Tabela E17 – Resultados para o conjunto de detectores C - sistema de 5 barras. 157

Tabela E18 – Resultados para o conjunto de detectores C - sistema de 33 barras. 158

Tabela E19 – Resultados para o conjunto de detectores C - sistema de 84 barras. 158

Tabela E20 – Resultados para o conjunto de detectores C - sistema de 134 barras. 159

Tabela E21 – Resultados para o conjunto de detectores D - sistema de 5 barras. 159

Tabela E22 – Resultados para o conjunto de detectores D - sistema de 33 barras. 160

Tabela E23 – Resultados para o conjunto de detectores D - sistema de 84 barras. 160

Tabela E24 – Resultados para o conjunto de detectores D - sistema de 134 barras. 161

Tabela E25 – Resultados para o conjunto de detectores E - sistema de 5 barras. 161

Tabela E26 – Resultados para o conjunto de detectores E - sistema de 33 barras. 162

Tabela E27 – Resultados para o conjunto de detectores E - sistema de 84 barras. 162

Tabela E28 – Resultados para o conjunto de detectores E - sistema de 134 barras. 163

Tabela E29 – Resultados para a taxa de afinidade A - sistema de 5 barras. 163

Tabela E30 – Resultados para a taxa de afinidade A - sistema de 33 barras. 164

Tabela E31 – Resultados para a taxa de afinidade A - sistema de 84 barras. 164

Tabela E32 – Resultados para a taxa de afinidade A - sistema de 134 barras. 165

Tabela E33 – Resultados para a taxa de afinidade B - sistema de 5 barras. 165

Tabela E34 – Resultados para a taxa de afinidade B - sistema de 33 barras. 166

Tabela E35 – Resultados para a taxa de afinidade B - sistema de 84 barras. 166

Tabela E36 – Resultados para a taxa de afinidade B - sistema de 134 barras. 167

Tabela E37 – Resultados para a taxa de afinidade C - sistema de 5 barras. 167

Tabela E38 – Resultados para a taxa de afinidade C - sistema de 33 barras. 168

Tabela E39 – Resultados para a taxa de afinidade C - sistema de 84 barras. 168

Tabela E40 – Resultados para a taxa de afinidade C - sistema de 134 barras. 169

LISTA DE ABREVIATURAS

AE	Algoritmos Evolutivos
AG	Algoritmo Genético
ATP	*Alternative Transients Program* ®
ASN	Algoritmo de Seleção Negativa
CLONALG	Algoritmo de Seleção Clonal
DNA	Ácido Desoxirribonucleico
EI	Engenharia Imunológica
EMTP	*Electromagnetic Transients Program* ®
kHz	Quilo Hertz
MHC	Complexo Principal de Histocompatibilidade (*Major Histocompatibylity Complex*)
RNA	Redes Neurais Artificiais
SCADA	Controle Supervisório e Aquisição de Dados (*Supervisory Control And Data Acquisition*)
SES	Sistemas Especialistas
SIA	Sistemas Imunológicos Artificiais
SIB	Sistema Imunológico Biológico
SI	Sistemas inteligentes
QEE	Qualidade de Energia Elétrica

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	**20**
1.1	***Objetivos e contribuições***	*22*
1.2	***Proposta***	*23*
1.3	***Justificativa***	*23*
1.4	***Organização da dissertação***	*24*
1.4.1	*Estrutura textual*	24
1.5	***Comentários***	*26*
2	**DISTÚRBIOS EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA**	**27**
2.1	***Introdução***	*27*
2.2	***Distúrbios de tensão***	*28*
2.2.1	*Harmônicos*	29
2.2.2	*Transitórios oscilatórios*	30
2.2.3	*Elevação de tensão - Swell*	31
2.2.4	*Afundamento de tensão - Sag*	32
2.2.5	*Interrupção de curta duração na tensão - Outage*	33
2.2.6	*Elevação e afundamento de tensão com harmônico*	34
2.3	***Comentários***	*35*
3	**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**	**36**
3.1	***Metodologias aplicadas no diagnóstico de distúrbios de tensão***	*36*
3.2	***Sistemas imunológicos artificiais***	*40*
3.3	***Comentários***	*43*
4	**MODELAGEM E SIMULAÇÕES**	**44**

4.1 Comentários *47*

5 SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS **48**

5.1 Introdução *48*

5.2 Formalização do conceito *49*

5.3 Visão geral do sistema imunológico Biológico *51*

5.4 Os Sistemas Imunológicos Artificiais *52*

5.4.1 Representação celular e afinidade 54

5.4.2 Maturação e afinidade 55

5.4.3 Memória imunológica 56

5.5 Propriedades dos sistemas imunológicos artificiais *56*

5.6 Aplicações dos sistemas imunológicos artificiais *57*

5.7 Algoritmo de seleção negativa *58*

5.8 Critério de casamento e taxa de afinidade *61*

5.9 Comentários *62*

6 METODOLOGIA PROPOSTA **64**

6.1 Sistema de diagnóstico de distúrbios de tensão *64*

6.1.1 Cálculo da taxa de afinidade 64

6.1.2 Fase de censoriamento 65

6.1.3 Fase de monitoramento 69

6.2 Exemplo didático *74*

6.3 Comentários *81*

7 TESTES E RESULTADOS **82**

7.1 Conjunto de testes *82*

7.2 Parâmetros *83*

7.3 Descrição dos testes *84*

7.3.1 Teste I 85

7.3.2 Teste II 87

7.3.3 Teste III 92

7.4 Análise e discussões dos resultados *95*

7.5 Estudo comparativo *97*

7.6 Comentários *101*

8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS **102**

8.1 Sugestões para trabalhos futuros *104*

REFERÊNCIAS **105**

APÊNDICE A - PUBLICAÇÕES **117**

ANEXO A – ANATOMIA DO SISTEMA IMUNOLÓGICO BIOLÓGICO **120**

A.1 Estrutura anatômica do sistema imunológico biológico *120*

a) Órgãos do sistema imunológico biológico 121

b) Imunidade inata e Imunidade adquirida 123

ANEXO B – DISCRIMINAÇÃO DO PRÓPRIO E NÃO-PRÓPRIO NO SISTEMA IMUNOLÓGICO BIOLÓGICO **125**

B.1 Discriminação próprio/não-próprio *125*

B.2 Princípio de seleção negativa *126*

B.3 Autoimunidade *127*

ANEXO C – PROPRIEDADES DO SISTEMA IMUNOLÓGICO BIOLÓGICO **129**

C.1 Propriedades do sistema imunológico biológico *129*

a) Detecção 129

b) Diversidade 130

c) Aprendizado 130

d) Tolerância 131

C.2 Princípios da organização do sistema imunológico biológico *131*

ANEXO D – DADOS DOS SISTEMAS TESTES **134**

D.1 Sistema de 5 barras *134*

D.2 Sistema de 33 barras *136*

D.3 Sistema de 84 barras *139*

D.4 Sistema de 134 barras *144*

ANEXO E – RESULTADOS DO TESTE DE REFERÊNCIA CRUZADA **149**

E.1 Teste I – Desvio $\mathcal{E}$ = 3% *149*

E.2 Teste I – Desvio $\mathcal{E}$ = 5% *151*

E.3 Teste II – Conjunto de detectores A *153*

E.4 Teste II – Conjunto de detectores B *155*

E.5 Teste II – Conjunto de detectores C *157*

E.6 Teste II – Conjunto de detectores D *159*

E.7 Teste II – Conjunto de detectores E *161*

E.8 Teste III – Taxa de afinidade A *163*

E.9 Teste III – Taxa de afinidade B *165*

E.10 Teste III – Taxa de afinidade C *167*

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, os sistemas elétricos apresentam-se em constante crescimento, em consequência do aumento dos núcleos populacionais e principalmente os núcleos industriais. Este crescimento é um desafio para as concessionárias, que devem fornecer energia elétrica aos seus consumidores de maneira sustentável e confiável proporcionando qualidade. (SOUZA, 2008).

Um sistema de distribuição de energia elétrica moderno (MCDONALD, 2003) deve satisfazer múltiplos objetivos, incluindo a melhoria da confiabilidade, eficiência e segurança do sistema. Para concretizar estes objetivos, nos últimos anos as concessionárias de energia elétrica passaram a investir em suas instalações, especialmente nos sistemas de distribuição de energia elétrica, visando automatizar, modernizar, e melhorar o processo de operação dos sistemas, com o objetivo de aumentar a lucratividade (MINUSSI, 2007). Estes investimentos buscam satisfazer exigências impostas para aumentar a confiabilidade, segurança e eficiência dos sistemas elétricos, bem como atender normas das agências reguladoras.

Duas modalidades de tecnologias se apresentam eficientes neste contexto, sendo a tecnologia da informação e a tecnologia digital. A tecnologia digital se refere ao uso de componentes semicondutores de alta velocidade em sistemas de telecomunicações, controle, e proteção, entre outras funções (ALAG et al., 2001; KEZUNOVIC; ABUR, 2005). A tecnologia da informação se baseia em um grande conjunto de procedimentos de análise e processamento de sinais (oscilografias e informações, tais como, a configuração do sistema, etc.) (MALLAT, 2009).

Partindo dessas tecnologias, podem-se desenvolver sistemas integrados que façam o processamento e a análise de dados com objetivo de proporcionar a assistência para realizar o controle e a tomada de decisão no ambiente de subestações (KEZUNOVIC; ABUR, 2005; NORTHCOTE-GREEN; WILSON, 2007; SALIM et al., 2008).

O conceito *Smart Grid* é um assunto muito discutido atualmente, cujo objetivo central é transformar os sistemas de energia elétrica, proporcionando modernizações nas tecnologias de geração, transmissão e, principalmente, na distribuição de energia elétrica. As abordagens vão desde a preocupação com mudanças climáticas, envelhecimento de instalações atuais, melhorias na qualidade de energia até a possibilidade de proporcionar, ao usuário final, maior

participação no planejamento e operação do sistema (DONGLI et al., 2011; GUNGOR et al. 2011). Com a introdução do *Smart Grid* nos sistemas de energia elétrica deverá ocorrer uma convergência entre a infraestrutura de geração, transmissão e distribuição com a infraestrutura de telecomunicações e processamento de dados. Esta convergência entre essas tecnologias exigirá o desenvolvimento de novos métodos de controle, automação, proteção, comunicação, e otimização visando modificar a maneira de realizar a operação dos sistemas elétricos (DONGLI et al., 2011).

Para que seja possível a aplicação deste conceito os métodos devem satisfazer duas condições: (DONGLI et al., 2011).

- **Autorrecuperação**: Capacidade de automaticamente detectar, analisar, responder e restaurar falhas na rede elétrica;
- **Qualidade de energia**: Prover energia com a qualidade exigida pela sociedade.

Assim, para difundir este novo paradigma de sistemas elétricos, os chamados *Smart Grids* (KEZUNOVIC; ABUR, 2005; KEZUNOVIC, 2011; RUSSEL; BENNER, 2010), a "inteligência" a ser incorporada no sistema será fortemente dependente da aplicação de técnicas/tecnologias baseadas na extração, "armazenamento" e utilização do conhecimento, por exemplo, usando-se redes neurais (HAYKIN, 1994), lógica *fuzzy* (ZADEH, 1995), transformada *wavelet* (MALLAT, 2009), sistemas imunológicos artificiais (de CASTRO; TIMMIS, 2002), entre outras técnicas. Esta inteligência será necessária para dotar os *smart grids* com capacidade de propor autocorreção de defeitos, entre outros recursos visando garantir a continuidade e o atendimento aos usuários da energia elétrica, com qualidade, o maior tempo possível.

Tradicionalmente, as práticas de diagnóstico de falhas são realizadas baseando-se no julgamento dos operadores humanos, levando em conta sua experiência na análise e no planejamento de ações corretivas (TONELLI-NETO, 2012). Estas práticas, por serem dependentes de operadores humanos, estão sujeitas a erros, que podem causar o indevido funcionamento do sistema de distribuição, como: interrupção no fornecimento de energia, e consequentemente prejuízos às concessionárias. Neste sentido as metodologias baseadas em inteligência artificial são capazes de extrair conhecimentos e informações, e são muito aplicadas a processos complexos, como a automação de subestações (BENDER, 1996). Estas técnicas buscam combinar a experiência dos operadores humanos e a capacidade de realizar rotinas de forma segura e com alta rapidez de resposta. Trata-se de mecanismos que, se postos à disposição da operação, podem produzir grandes saltos qualitativos, por meio de

procedimento de diagnóstico (detecção, classificação e localização) dos defeitos e de auxílio ao planejamento de ações corretivas proporcionando alternativas para realizar a automação de subestações de forma plena e eficiente.

Os sistemas imunológicos artificiais são técnicas promissoras no campo da inteligência computacional. Sua concepção é inspirada nos Sistemas Imunológicos Biológicos. Visa reproduzir, computacionalmente, suas principais características, propriedades e habilidades (DASGUPTA, 1998). Os sistemas imunológicos artificiais constituem-se em ferramentas adequadas para a realização de diagnósticos, em consequência da sua habilidade de detecção de mudanças de comportamento em padrões, ou simplesmente detecção de anormalidades. Além de muitas vantagens, os sistemas imunológicos artificiais permitem incluir novos padrões anormais no processo de diagnóstico, sem a necessidade de reiniciar a memória do sistema, isto é, permite uma aprendizagem contínua, portanto, o sistema pode se tornar mais eficiente, acompanhar a evolução da área de aplicação e obter conhecimento à medida que novos padrões são disponibilizados.

1.1 Objetivos e contribuições

Esta pesquisa de mestrado tem por objetivo o desenvolvimento de um sistema inteligente capaz de realizar, de maneira integrada, o diagnóstico de anormalidades em sistemas de distribuição de energia elétrica. As anormalidades a serem abordadas nesta pesquisa referem-se à classe de eventos de distúrbios de tensão. O diagnóstico destes eventos é uma tarefa complexa, com um grau de dificuldade elevado, razão pela qual são persistentes e provocam grandes danos em termos de qualidade da energia fornecida aos consumidores. Detectá-los, bem como classificá-los constitui-se de uma rotina importante na operação dos modernos sistemas de distribuição de energia elétrica. O sistema inteligente desenvolvido baseou-se nos sistemas imunológicos artificiais (SIA), em especial, o algoritmo de seleção negativa (ASN) (FORREST et al., 1994). O sistema deverá contemplar os distúrbios de tensão. Por conseguinte, o objetivo refere-se ao desenvolvimento de um método capaz de incorporar permanentemente inovações visando robustez, confiabilidade e eficiência.

Esta dissertação tem como principais objetivos e contribuições:

- apresentar um método inédito para diagnóstico de distúrbios de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica baseando-se em conceitos imunológicos;
- apresentar resultados em mais de dois sistemas elétricos, visando verificar a eficiência e robustez do método proposto;

- apresentar uma revisão bibliográfica sobre os sistemas imunológicos artificiais, abordando os principais trabalhos que contribuíram para o desenvolvimento desta linha de pesquisa, e apresentar uma revisão bibliográfica comparando diferentes metodologias encontradas na literatura especializada, utilizadas para realizar o diagnóstico de distúrbios de tensão. Os resultados destes trabalhos servem como base comparativa para avaliar os resultados e desempenho do método proposto neste trabalho;

1.2 Proposta

Esta pesquisa de mestrado tem como proposta:

- apresentar um método para auxiliar a operação dos sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando conceitos imunológicos;
- auxiliar a tomada de decisão;
- realizar o diagnóstico de distúrbios de tensão;
- supervisionar o sistema de proteção;
- melhorar o processo de análise de sinais;
- auxiliar no planejamento de ações corretivas;
- melhorar a qualidade da energia;
- minimizar falhas no fornecimento da energia.

1.3 Justificativa

Os diagnósticos de falhas em sistemas de distribuição de energia elétrica são totalmente vinculados à experiência de operadores humanos, o que torna o processo de decisão restrito, justamente quando estas decisões devem ser tomadas rapidamente e de maneira eficiente, sempre buscando eliminar a falha no sistema elétrico. Deve-se ressaltar que nem todas as decisões podem ser tomadas, com base apenas na experiência e percepção dos operadores. Assim, torna-se necessária a automatização de processos de análise de dados, proporcionando uma maior eficiência na operação dos sistemas de energia elétrica.

Na literatura especializada encontram-se diversos métodos baseados em inteligência artificial, que combinados com a experiência do operador proporcionam rapidez, segurança, eficiência no processo de diagnósticos de falhas, e principalmente apresentando ótimos resultados.

Neste contexto, a proposta desta pesquisa é apresentar uma ferramenta computacional para diagnósticos de distúrbios de tensão em sistema de distribuição de energia elétrica, aéreos e radiais para auxiliar a operação do sistema durante falhas, bem como supervisionar o sistema de proteção.

Os sistemas imunológicos artificiais foram propostos inicialmente visando resolver problemas de segurança computacional, nestes trabalhos os resultados apresentados são satisfatórios. Tendo em vista que os métodos apresentam bons resultados em outras áreas de pesquisa, neste trabalho a proposta é utilizar estes conceitos, para propor uma nova abordagem para realizar o diagnóstico de falhas em sistemas de energia elétrica.

Na literatura especializada não foi encontrado nenhuma referência baseada em sistemas imunológicos artificiais para detecção de distúrbios de tensão, o que valoriza ainda mais esta pesquisa, proporcionando uma contribuição inédita.

1.4 Organização da dissertação

Esta dissertação está formalizada em um texto composto por oito capítulos, um apêndice e cinco anexos, como descrito a seguir:

1.4.1 Estrutura textual

O texto está organizado da seguinte forma:

Capítulo 1: **Introdução**

Neste capítulo apresentam-se os principais aspectos que fundamentam o desenvolvimento deste trabalho. O enfoque do trabalho, a proposta, as motivações, os objetivos e contribuições fazem parte desta introdução.

Capítulo 2: **Distúrbios em sistemas de energia elétrica**

No capítulo 3 são apresentados os distúrbios de tensão, enfocando em causas, e maneiras de corrigi-los.

Capítulo 3: **Revisão Bibliográfica**

Os principais livros, artigos, dissertações e teses utilizadas como embasamento teórico para a realização da pesquisa são apresentados neste capítulo. Neste são abordadas as principais literaturas sobre os sistemas imunológicos artificiais e também as principais metodologias de diagnóstico em sistemas elétricos, com enfoque nos distúrbios de tensão.

Capítulo 4: **Modelagem e simulações**

O processo de modelagem e simulação que foi realizado neste trabalho, visando obter uma base de dados para testar o desempenho do sistema desenvolvido é apresentado neste capítulo.

Capítulo 5: **Sistemas imunológicos artificiais**

Este capítulo tem por objetivo, apresentar os sistemas imunológicos artificiais, destacando-se os principais conceitos e formalizações que proporcionam o entendimento das ideias apresentadas e utilizadas neste trabalho. Neste capítulo também se apresenta os passos e fluxogramas do algoritmo de seleção negativa, no qual é possível compreender o seu funcionamento.

Capítulo 6: **Metodologia proposta**

No capítulo 6, encontra-se uma descrição da metodologia proposta, em que são apresentados os passos e processos para realizar o diagnóstico de distúrbios de tensão utilizando conceitos imunológicos.

Capítulo 7: **Aplicações e resultados**

Os resultados obtidos pelo método proposto, bem como as diversas aplicações que foram realizadas para testar e analisar seu desempenho são apresentados no capítulo 7.

Capítulo 8: **Conclusões**

Finalmente, no capítulo 8, encontram-se as conclusões desta pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

Apêndice A: **Publicações**

No apêndice encontram-se as publicações realizadas pelo autor no período do curso de mestrado. São apresentadas as publicações relacionadas com o tema de pesquisa, e também outras publicações desenvolvidas com amigos, professores e colegas do laboratório SINTEL - Sistemas Inteligentes.

Anexo A: **Anatomia do sistema imunológico biológico**

Neste anexo é apresentada a anatomia do sistema imunológico biológico. Neste anexo apresentam-se os conceitos de imunidade inata e imunidade adquirida, os órgãos primários e secundários do organismo humano e suas funções.

Anexo B: **Discriminação do próprio e não-próprio no sistema imunológico biológico**

No anexo B é apresentado o processo de discriminação próprio/não-próprio do sistema imunológico biológico, abordando o princípio de seleção negativa e a autoimunidade. O

processo de discriminação próprio/não-próprio é a base teórica para o algoritmo de seleção negativa.

Anexo C: **Propriedades do sistema imunológico biológico**

Neste anexo apresentam-se as propriedades do sistema imunológico biológico.

Anexo D: **Dados dos sistemas testes**

No anexo D apresentam-se os dados dos sistemas testes utilizados neste trabalho.

Anexo E: **Resultados do teste de referência cruzada**

Neste anexo apresentam-se os resultados obtidos no teste de referência cruzada, onde o sistema de diagnóstico foi executado 20 vezes para cada teste e para cada sistema elétrico utilizado neste trabalho.

1.5 Comentários

Neste capítulo foram apresentados uma introdução sobre o problema abordado nesta pesquisa, os objetivos, a proposta, a justificativa e, por fim, a organização do texto.

2 DISTÚRBIOS EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA

Neste capítulo serão apresentados os distúrbios em sistemas de energia elétrica, abordando principalmente os distúrbios de tensão. Serão apresentadas as causas, os efeitos e as possíveis soluções para os tipos de distúrbios de tensão abordados nesta pesquisa.

2.1 Introdução

Todos os sistemas de distribuição de energia elétrica estão susceptíveis a problemas e falhas em sua operação. Sendo estas falhas provocadas principalmente por:

- mau funcionamento de equipamentos;
- queimadas;
- contatos de animais às partes energizadas;
- fenômenos naturais;
- entre outros.

Estes eventos podem causar a interrupção do fornecimento de energia, ou afetar a qualidade da energia elétrica (QEE), introduzindo harmônicos e degradando os índices de qualidade na energia fornecida pelas concessionárias e, como consequência, elevar os custos operacionais.

Dentre os principais defeitos que afetam o sistema de distribuição de energia elétrica, podem ser destacadas três classes de distúrbios, sendo a falta de curto-circuito, a falta de alta impedância e os distúrbios de tensão. A falta de curto-circuito e a falta de alta impedância se relacionam a problemas na corrente elétrica e os distúrbios de tensão, também conhecidos como distúrbios de qualidade de energia se relacionam a problemas na tensão elétrica (TONELLI-NETO, 2012).

Um curto-circuito é caracterizado por uma ligação acidental entre condutores do sistema. Nos sistemas elétricos trifásicos, é possível ocorrer quatro tipos de curtos-circuitos, sendo: o curto-circuito monofásico, o curto-circuito bifásico sem conexão com a terra, o curto-circuito bifásico com conexão à terra e por fim o curto-circuito trifásico (TONELLI-NETO et al., 2011).

A falta de alta impedância é caracterizada pelo contato de um condutor energizado a superfícies de alta impedância, como, asfalto, calçadas e areia, ou objetos de alta impedância, como, galhos de árvores. Estes objetos e superfícies limitam os valores dos níveis de corrente de falta a valores inferiores aos detectáveis pelos equipamentos de proteção (SARLAK; SHAHRTASH, 2011).

Os distúrbios de tensão têm a característica de apresentar variações de curta duração na magnitude da tensão a partir de um valor nominal. Dependendo da magnitude da variação, os distúrbios são classificados como interrupções, elevações e afundamentos, dependendo de sua duração que pode ser instantânea, momentânea ou temporária (DECANINI et al., 2011).

Em relação à qualidade de energia, a categoria de distúrbios de tensão corresponde ao conjunto de distúrbios mais graves, em consequências prejudiciais do seu efeito sobre equipamentos ligados à rede.

Estes distúrbios podem ter origem ou se manifestar em diferentes pontos de um sistema de distribuição, tanto nas imediações de uma instalação consumidora, como fora dela (DUGAN et al., 1996).

Na literatura são utilizados alguns aspectos para avaliar a qualidade do fornecimento de energia elétrica, entre elas podem-se citar: (DUGAN et al., 1996):

- a continuidade do fornecimento;
- o nível de tensão;
- oscilações de tensão;
- os desequilíbrios de tensão e corrente;
- as distorções harmônicas de tensão;
- a interferência em sistemas de comunicações.

Este trabalho irá contemplar, em especial, as anormalidades de tensão. A seguir apresenta-se uma descrição mais detalhada dos distúrbios abordados neste trabalho.

2.2 Distúrbios de tensão

Como já mencionado anteriormente, os distúrbios de tensão apresentam variações de curta duração na magnitude da tensão a partir de um valor nominal, oscilações na tensão e distorções na forma de onda. Partindo destas ocorrências, os distúrbios de tensão podem ser classificados como afundamento, elevação, interrupções, harmônicos e transitórios.

Os principais efeitos que os distúrbios de tensão podem causar são:

- interrupção do fornecimento de energia;
- interferências nos sistemas de comunicação;
- superaquecimento de condutores;
- medições imprecisas;
- atuação indevida de relés.

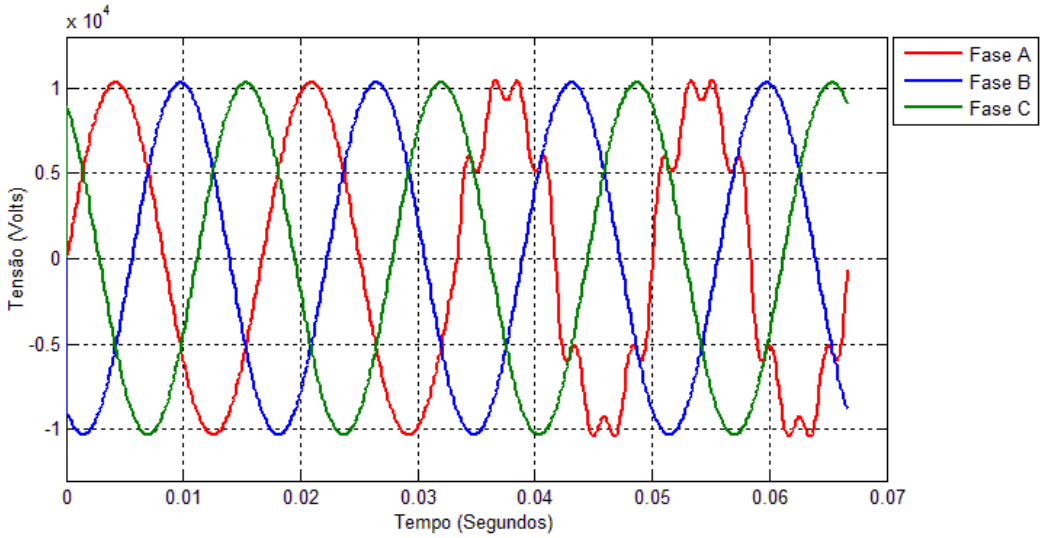
Neste trabalho serão abordados 7 distúrbios de tensão. Entre eles estão o harmônico, o transitório oscilatório, a elevação de tensão (*Swell*), o afundamento de tensão (*Sag*) e a interrupção do fornecimento de tensão (*Outage*). Também são abordados duas classes de distúrbios decorrentes da mistura de harmônico com elevação de tensão (*Swell*-harmônico), e harmônico com afundamento de tensão (*Sag*-harmônico).

Na sequência apresentam-se algumas definições clássicas para os distúrbios, abordados neste trabalho.

2.2.1 Harmônicos

Na figura 1 ilustra-se um distúrbio harmônico ocorrendo na fase A do sistema.

Figura 1 – Exemplo de um distúrbio harmônico presente na fase A do sistema.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

As distorções harmônicas constituem-se de uma alteração no padrão normal da tensão, causada por um tipo específico de frequências múltiplas da frequência fundamental (60 Hz), estas frequências são consideradas uma energia “suja” (poluída ou contaminada) que causa

distorções na forma de onda normal. As distorções harmônicas são causadas principalmente pelo acionamento de inversores de frequência, acionamento de variadores de velocidade, fontes chaveadas, cargas-lineares, e outros dispositivos eletrônicos de acionamento, por exemplo, reatores de lâmpadas eletrônicas (DUGAN et al., 1996).

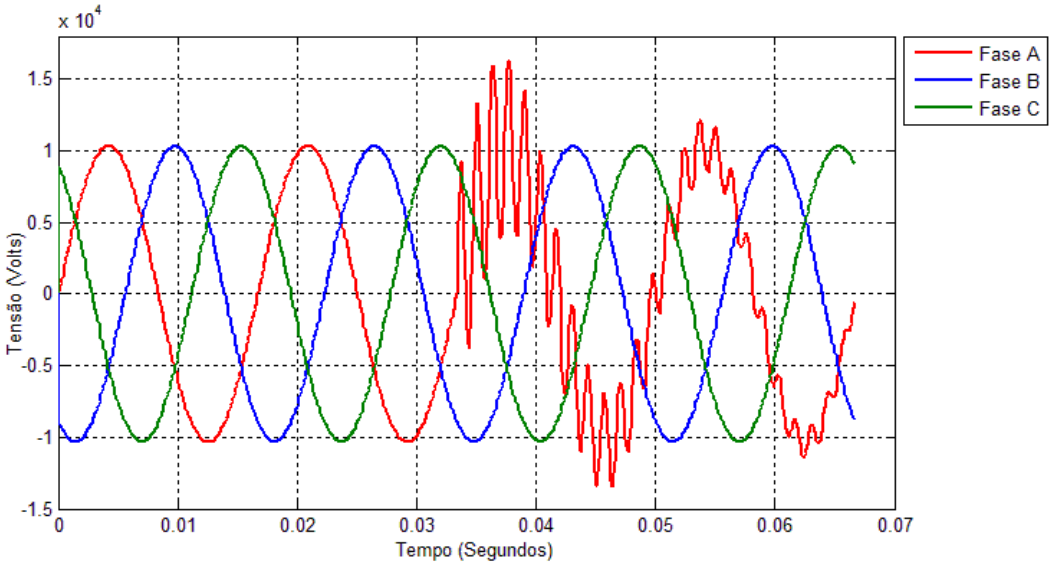
As distorções harmônicas causam efeitos como sobreaquecimento de cabos e equipamentos, diminuição do desempenho de motores, operação errônea de disjuntores, relés e fusíveis, danos a capacitores, etc. Para eliminar as distorções harmônicas podem-se utilizar como solução: filtros de harmônicas, reatores de linha, melhorias nas fiações e no aterramento e transformadores isoladores (BOLLEN, 1999).

2.2.2 Transitórios oscilatórios

Um transitório oscilatório tem como principal característica uma alteração súbita nas condições de regime permanente da tensão, contendo em um pequeno espaço de tempo uma variação com valores de polaridade positiva e negativa. Os transitórios oscilatórios são definidos através de seu conteúdo espectral, duração e magnitude da tensão. As principais causas são decorrentes de chaveamento de bancos de capacitores e transformadores, de corte de corrente indutiva, da energização de linhas, da eliminação de faltas, entre outros (BOLLEN, 1999).

Na figura 2 ilustra-se um transitório oscilatório ocorrendo na fase A do sistema.

Figura 2 - Exemplo de um transitório oscilatório presente na fase A do sistema.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

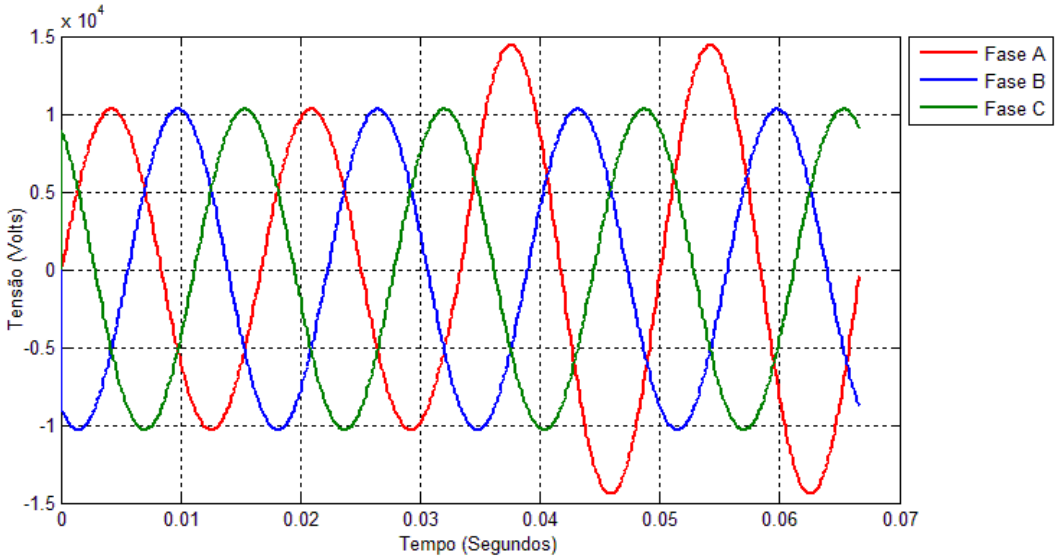
Os transitórios oscilatórios podem causar efeitos como o mau funcionamento de equipamentos controlados eletronicamente e reduzir a vida útil de motores, geradores, transformadores, entre outros dispositivos conectados a rede elétrica. Visando eliminar os transitórios oscilatórios do sistema elétrico, podem-se utilizar como solução: filtros, supressores de surto e transformadores isoladores (DUGAN et al., 1996).

2.2.3 Elevação de tensão - Swell

Uma elevação de tensão ou sobretensão de curta duração, do inglês "*swell*" tem como principal característica um aumento entre 0,1 e 0,8 pu (por unidade) no valor de tensão nominal. Este evento ocorre com tempo inferior a 1 minuto de duração. As principais causas de sobretensão são: partida de grandes equipamentos, curtos-circuitos, falha em equipamentos ou manobras da concessionária, variações de cargas, chaveamento de banco de capacitores, equipamentos e fiação sobrecarregados, utilização imprópria de transformadores, fiação subdimensionada ou conexões mal feitas (BOLLEN, 1999).

Na figura 3 ilustra-se um distúrbio *swell* ocorrendo na fase A do sistema.

Figura 3 - Exemplo de um distúrbio *swell* presente na fase A do sistema.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A sobretensão pode causar efeitos como: redução de índice de iluminação para os circuitos de iluminação incandescente, perda de dados e erros de processamento, desligamento e danos a equipamentos, oscilações e sobreaquecimento em motores e lâmpadas, redução da vida útil ou de eficiência de equipamentos, e falha de operação de

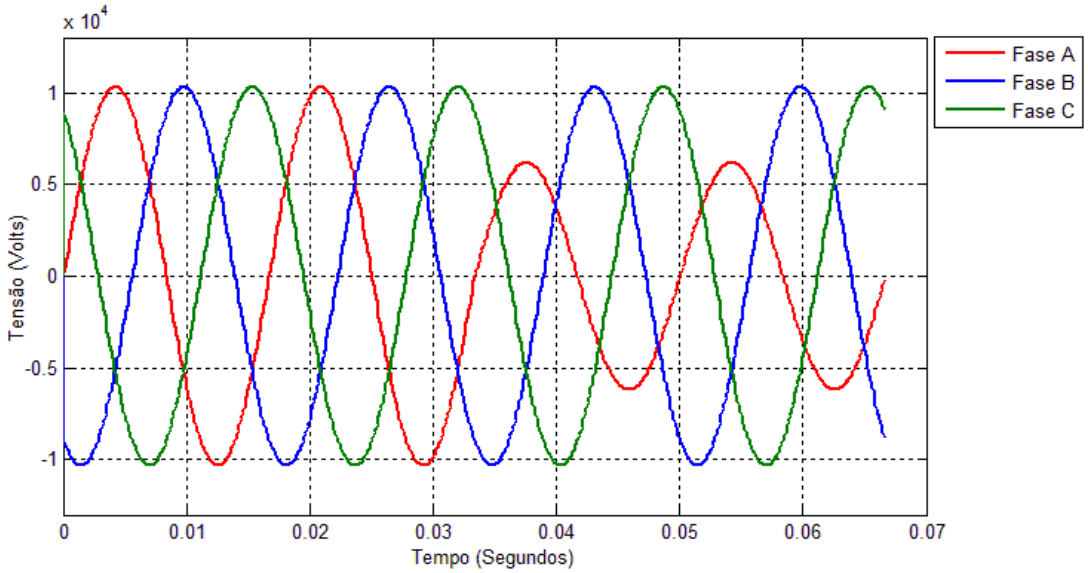
dispositivos. Visando eliminar uma sobretensão no sistema elétrico, podem-se utilizar como solução: reguladores de tensão, instalação de compensadores estáticos de reativos, verificação de conexões e fiações elétricas e transferência de equipamentos para outros circuitos (BOLLEN, 1999).

2.2.4 Afundamento de tensão - Sag

Os afundamentos de tensão ou subtensão, do inglês "*sag*" tem como principal característica uma queda entre 0,1 e 0,9 pu no valor nominal da tensão. Este evento ocorre com tempo inferior a 1 minuto de duração. Assim como a elevação de tensão o afundamento de tensão tem como principais causas de sobretensão são: partida de grandes equipamentos, curtos-circuitos, falha em equipamentos ou manobras da concessionária, variações de cargas, chaveamento de banco de capacitores, equipamentos e fiação sobrecarregados, utilização imprópria de transformadores, fiação subdimensionada ou conexões mal feitas (BOLLEN, 1999).

Na figura 4 ilustra-se um distúrbio *sag* ocorrendo na fase A do sistema.

Figura 4 - Exemplo de um distúrbio *sag* presente na fase A do sistema.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os efeitos causados por um afundamento de tensão são os mesmos causados por uma sobretensão, sendo os principais efeitos: redução de índice de iluminação para os circuitos de iluminação incandescente, perda de dados e erros de processamento, desligamento e danos a equipamentos, oscilações e sobreaquecimento em motores e lâmpadas, redução da vida útil ou

de eficiência de equipamentos, e falha de operação de dispositivos. Visando eliminar um afundamento no sistema elétrico, podem-se utilizar como solução: reguladores de tensão, instalação de compensadores estáticos de reativos, verificação de conexões e fiações elétricas e transferência de equipamentos para outros circuitos (BOLLEN, 1999).

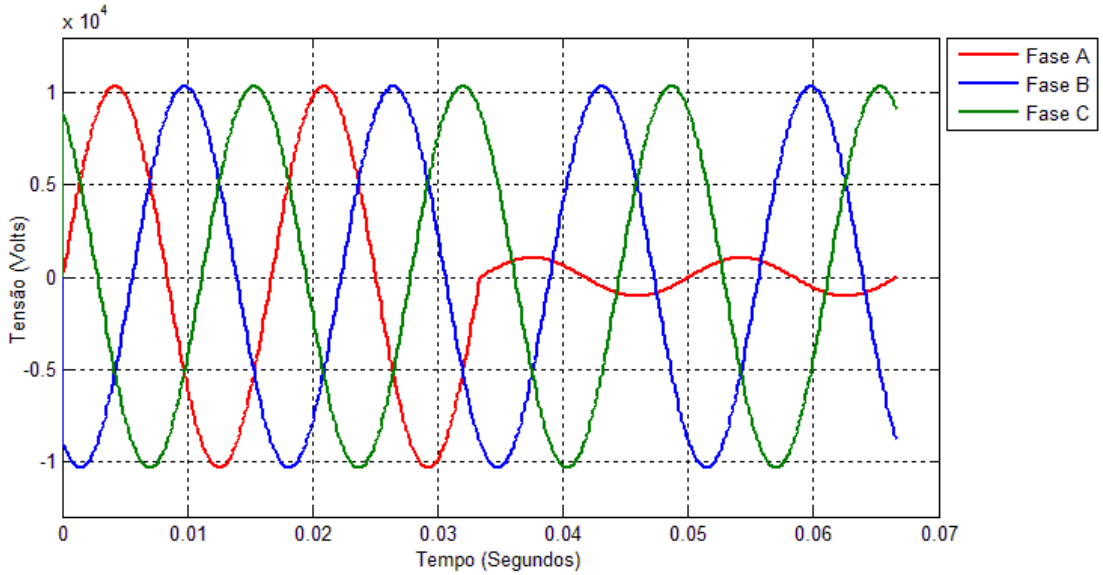
2.2.5 Interrupção de curta duração na tensão - Outage

Uma interrupção de curta duração ou "*outage*" do inglês tem como principal característica uma queda no valor nominal de tensão para um valor menor que 0,1 pu por um período de tempo inferior a 1 minuto (DUGAN et al., 1996).

A interrupção de curta duração pode ser causada por faltas no sistema de energia elétrica, mau funcionamento do sistema de controle, descargas atmosféricas, curtos-circuitos e falhas de equipamentos. Os principais efeitos causados decorrentes de uma interrupção de curta duração são: queda do sistema, falha de equipamentos eletrônicos e de iluminação, danificação de componentes do sistema elétrico, desligamento de equipamentos e interrupção do processo produtivo. Visando eliminar uma interrupção de tensão no sistema elétrico, podem-se utilizar como solução: geradores de emergência e *nobreaks* (para sistemas de bixa potência) (BOLLEN, 1999).

Na figura 5 ilustra-se um distúrbio *outage* ocorrendo na fase A do sistema.

Figura 5 - Exemplo de um distúrbio *outage* presente na fase A do sistema.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

2.2.6 Elevação e afundamento de tensão com harmônico

A elevação de tensão com harmônico ou afundamento de tensão com harmônico são classes de distúrbio que combinam dois distúrbios em um só, ou seja, é uma mistura do distúrbio harmônico com o distúrbio de elevação ou afundamento de tensão.

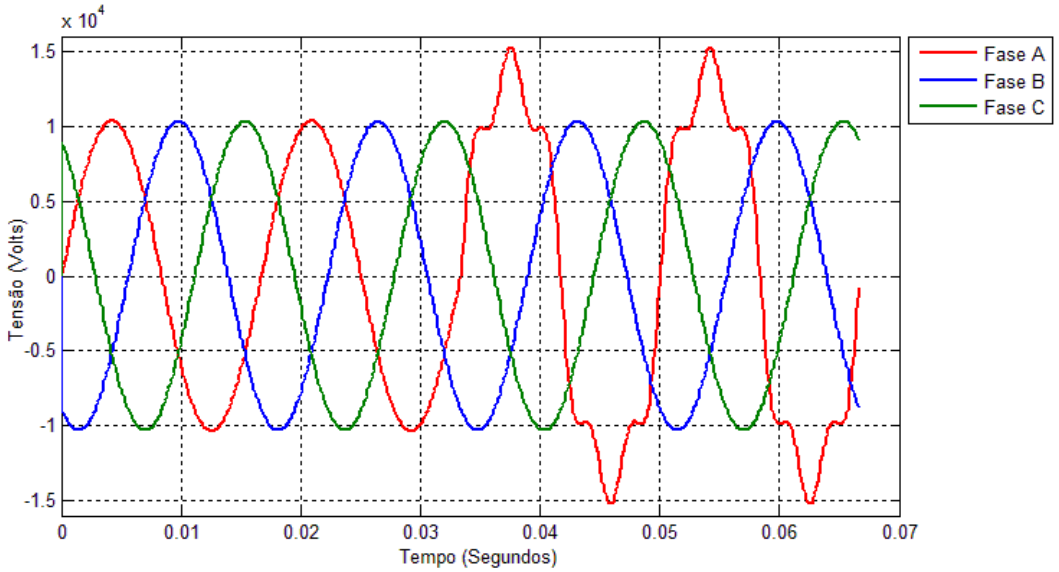
A elevação de tensão de curta duração com harmônico tem como principal característica um aumento entre 0,1 e 0,8 pu no valor de tensão nominal e uma alteração no padrão normal da tensão, causada por frequências múltiplas da frequência fundamental. Este evento ocorre com tempo inferior a 1 minuto de duração.

O afundamento de tensão de curta duração com harmônico tem como principal característica uma queda entre 0,1 e 0,9 pu no valor de tensão nominal e uma alteração no padrão normal da tensão, causada por frequências múltiplas da frequência fundamental. Este evento ocorre com tempo inferior a 1 minuto de duração.

Para que ocorra a elevação de tensão com harmônico ou afundamento de tensão com harmônico é necessário que as causas dos dois distúrbios aconteçam em conjunto. Os efeitos causados por estes dois distúrbios são os mesmos causados pelos distúrbios individualmente, porém quando um distúrbio ocorre, acontecem mais de um efeito ao mesmo tempo (BOLLEN, 1999).

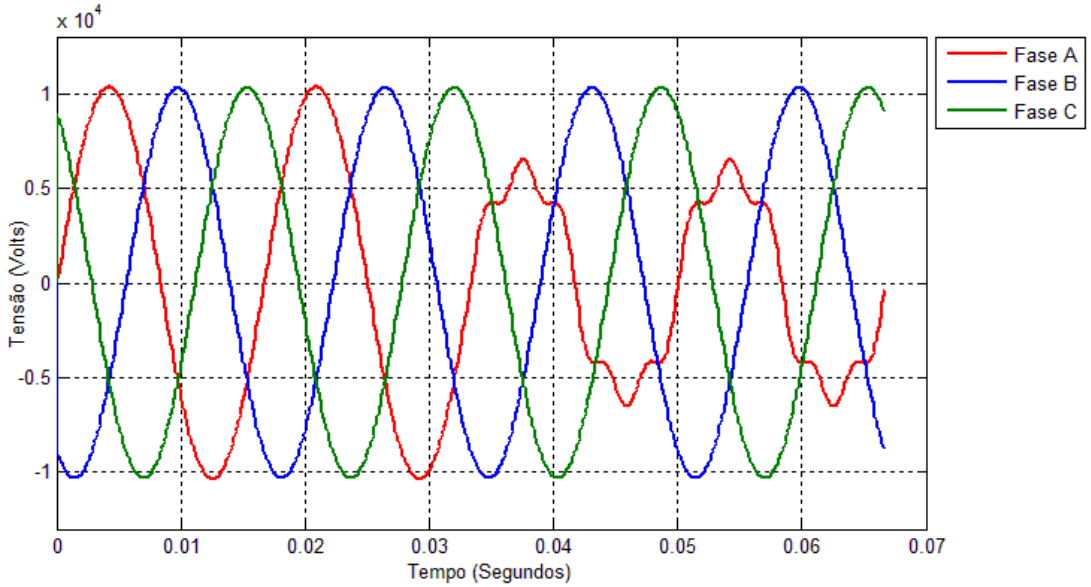
Nas figuras 6 e 7 ilustram-se um distúrbio *swell*-harmônico ocorrendo na fase A do sistema e um distúrbio *sag*-harmônico ocorrendo na fase A do sistema.

Figura 6 - Exemplo de um distúrbio *swell*-harmônico presente na fase A do sistema.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 7 - Exemplo de um distúrbio *sag*-harmônico presente na fase A do sistema.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

2.3 Comentários

Nesta seção foram apresentados os distúrbios em sistemas de energia elétrica, abordando principalmente os distúrbios de tensão. As principais causas, efeitos e soluções para estas perturbações foram apresentadas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta-se uma revisão bibliográfica relacionando as principais publicações sobre métodos e técnicas aplicadas na resolução do problema de detecção e classificação de distúrbios de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica. Também, neste capítulo, apresenta-se uma revisão bibliográfica dos sistemas imunológicos artificiais, utilizando a literatura especializada como fonte para compor a evolução deste conceito ao longo dos anos, apresentando os principais trabalhos.

3.1 Metodologias aplicadas no diagnóstico de distúrbios de tensão

Considerando que o foco central deste trabalho é o problema de detecção e classificação de distúrbios em sistemas de distribuição de energia elétrica, neste tópico serão apresentadas as principais publicações que contribuíram para o desenvolvimento das pesquisas nesta área, com um enfoque para os distúrbios de tensão.

Nos artigos de Fukui e Kawakami (1986) e Monsef et al. (1997) foram propostos métodos baseados em sistemas especialistas (SES) para realizar o diagnóstico de falhas em sistemas de distribuição de energia elétrica com a finalidade de auxiliar, e dar apoio na operação do sistema. A grande dificuldade destes trabalhos foi obter o conhecimento especialista necessário para o desenvolvimento e implementação do sistema.

Os sistemas inteligentes (SI) são muito utilizados na tarefa de diagnóstico de falhas em sistemas de distribuição de energia elétrica, pois se ajustam bem ao diagnóstico por causa da ausência de uma formulação analítica eficaz, capaz de solucionar o problema.

Nos trabalhos de Carpenter et al. (1992), Kartalopoulos (1996) e AMIS e Carpenter, (2010) são apresentados os métodos baseados em redes neurais artificiais aplicados no diagnóstico de falhas em sistemas de distribuição. Já em Zadeh (1995), Chen et al. (2000), Decanini (2008) e Barros (2009) as metodologias baseavam-se em lógica *fuzzy*. Os trabalhos de Wen e Chang (1997) e Chang e Wen (1998) baseiam-se em metaheurísticas como o algoritmo genético e a busca tabu aplicadas no diagnóstico de falhas. Uma aplicação para diagnóstico em sistemas elétricos utilizando redes de Petri é apresentada no trabalho de Lo et al. (1997).

Estes trabalhos citados anteriormente são umas das principais referências, essenciais dentro do contexto de ferramentas de apoio a decisão, diagnósticos de falhas e automação de sistemas de energia elétrica utilizando técnicas de sistemas inteligentes. Todas estas técnicas e metodologias citadas contribuíram para a evolução dos sistemas de diagnóstico.

No entanto, tratando-se do diagnóstico de distúrbios de tensão em sistemas de distribuição, podem-se destacar os seguintes trabalhos.

Em Santoso et al. (2000) é apresentado um sistema para reconhecimento de distúrbios de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica no domínio da transformada *wavelet*. Neste método é empregada a teoria da evidência de Dempster-Shafer (BENMOKHTAR; HUET, 2006) para integrar a saída de um conjunto de redes neurais responsáveis pela classificação.

Dash et al. (2000) apresentam um esquema híbrido utilizando um combinador linear de Fourier e um sistema especialista *fuzzy* para classificar distúrbios em sistemas de energia. Neste método as formas de onda de tensão capturadas são passadas pelo combinador linear de Fourier visando obter a amplitude de pico normalizada, está informação é apresentada para o sistema especialista *fuzzy* que faz a classificação do distúrbio.

He e Starzyk (2006) propuseram uma nova abordagem para o diagnóstico de distúrbios de qualidade de energia, sendo utilizado como base à transformada *wavelet* em conjunto com uma rede neural de Kohonen. A transformada wavelet é utilizada para extrair características do sinal com base na análise multiresolução. Em seguida utiliza-se a rede neural para realizar o diagnóstico.

No trabalho de Reaz et al. (2007) é apresentado um sistema especialista composto por técnicas como a transformada *wavelet*, redes neurais e lógica *fuzzy*, para classificar distúrbios de qualidade de energia. Neste sistema utiliza-se a transformada *wavelet* para extrair características do sinal e apresentar para a rede neural que realiza um processamento, na sequência um classificador *fuzzy* identifica os distúrbios de tensão.

Bhende et al. (2007) apresentam uma rede neural com um módulo baseado na transformada de Laplace (*S-transform*) para detecção e classificação de distúrbios de qualidade de energia, ou como também conhecidos, os distúrbios de tensão. O módulo *S-transform* é responsável por extrair características dos sinais e alimentar as entradas da rede neural. Segundo os autores a transformada de Laplace leva uma vantagem sobre a transformada *wavelet*, pois é mais sensível a ruídos e perturbações.

Em Uyar et al. (2008) apresenta-se uma rede neural *multi-layer perceptron* para classificação de distúrbios de qualidade de energia. Neste trabalho utiliza-se o algoritmo de

treinamento de *backpropagation* Levenberg-Marquardt. Os dados são processados via transformada *wavelet*, sendo obtidos coeficientes de detalhe e aproximação que servem de entrada para a rede neural que responsável por classificar os distúrbios.

Um sistema hibrido para detecção, localização e classificação automática de distúrbios de qualidade de energia é apresentado em Oleskovicz et al. (2009). Inicialmente utiliza-se a transformada *wavelet* para detectar perturbações no sistema e localizar o tempo de sua ocorrência, quando tal evento é identificado, um conjunto de redes neurais são aplicadas para classificar o distúrbio encontrado. Para este trabalho utilizou-se o ATP (*Alternative Transientes Program)* para simular distúrbios em um alimentador real.

Já em Panigrahi e Pandi (2009) é apresentado um classificador automático de distúrbios de qualidade de energia utilizando a transformada *wavelet packet* e técnicas baseadas em lógica *fuzzy*. Os coeficientes de detalhe extraídos via transformada *wavelet packet* são decompostos em quatro níveis de resolução. Estes coeficientes servem como entrada para um classificador baseado em lógica *fuzzy* responsável por identificar os distúrbios de qualidade.

Um algoritmo baseado na transformada *wavelet* e na máquina de suporte vetorial foi proposto em Eristi et al. (2010) para detecção de distúrbios de tensão. O processo é dividido em três etapas. Inicialmente extraem-se as características utilizando a transformada *wavelet*, na sequência estes atributos extraídos são organizados de forma sequencial e, por fim, a máquina de vetor suporte classifica os distúrbios.

Masoum et al. (2010) apresentaram um método para detecção e classificação de distúrbios de qualidade de energia utilizando a transformada *wavelet* discreta e a rede neural *wavelet*. Neste trabalho é utilizada a transforma *wavelet* para extrair características que serão analisadas pela rede neural *wavelet* responsável por classificar o sinal.

Uma ferramenta para analisar distúrbios de qualidade de energia em sistemas elétricos utilizando *wavelets* e a teoria de conjuntos *fuzzy* é apresenta no trabalho de Meher; Pradhan (2010). Nesta ferramenta a transformada *wavelet* é utilizada para extrair características dos eventos de qualidade de energia e, em seguida, um classificador nebuloso é utilizado para realizar o diagnóstico.

No artigo proposto por Zhang et al. (2011) é apresentado um método de classificação de distúrbios de qualidade de energia em tempo-real. Neste método é usada a transformada discreta de Fourier para extrair características dos sinais e uma árvore de decisão baseada em regras (*Rule-Based Decision Tree*) para fazer a classificação dos distúrbios.

Um sistema para detecção e classificação de anomalias de tensão em sistemas elétricos utilizando uma rede Neuro-*Fuzzy*-*Wavelet* foi proposto na tese de doutorado apresentada em Malange (2010). A estrutura desta rede se divide em três módulos, sendo o módulo de detecção, o módulo de extração de características e o módulo de classificação. O módulo de detecção é onde os sinais anormais são identificados utilizando o coeficiente de normalidade, o módulo de extração de características faz a análise dos sinais anormais utilizando *wavelet* e por fim uma rede neural ARTMAP-*fuzzy* classifica os distúrbios.

No trabalho de Decanini et al. (2011) é apresentado um método para diagnóstico de distúrbios de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica. Neste caso, foi usada transformada *wavelet* para extração das características das oscilografias de tensão, na sequência as informações são agregadas via conceito entropia e utilizadas como entrada em uma rede neural ARTMAP-*Fuzzy*, que é responsável por realizar a classificação dos distúrbios. Nesse trabalho, os autores simularam um alimentador real de 134 barras no software ATP, visando gerar uma base de dados para avaliar o método proposto.

Na dissertação de mestrado de Tonelli-Neto (2012) foi apresentado um método para realizar o diagnóstico automático de distúrbios (tensão, curto-circuito e faltas de alta impedância) em sistemas de distribuição de energia elétrica. Neste método, foi usada a transformada *wavelet* e a norma entropia para extrair e agregar o conhecimento das oscilografias de corrente e tensão, que servirão de entrada para uma rede neural ARTMAP-*Fuzzy* responsável por classificar os distúrbios. Para analisar o desempenho do sistema foram realizadas simulações em um sistema de 134 barras utilizando o software ATP. Este método é o mesmo aplicado em Decanini et al. (2011), porém contempla além dos distúrbios de tensão, os distúrbios de corrente (faltas de curto-circuito e alta impedância).

Em Barros et al. (2012) foi apresentada uma metodologia para realizar a classificação de distúrbios de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica, utilizando uma rede neural ARTMAP euclidiana modificada com treinamento continuado. O módulo de treinamento continuado permite que novos conhecimentos sejam apresentados para a rede neural sem a necessidade de reiniciar o processo de treinamento, o que proporciona uma análise mais eficiente em relação a outras redes neurais disponíveis na literatura. Para avaliar o método proposto foi utilizado um alimentador de 134 barras, modelado e simulado no software ATP.

Nas buscas realizadas na literatura especializada não foi encontrada, salvo engano, nenhuma publicações relacionada a diagnóstico de distúrbios de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando conceitos baseados nos sistemas imunológicos

artificiais. Assim, a proposta deste trabalho tem por objetivo contribuir para esta área de pesquisa, apresentando uma abordagem inédita para o diagnóstico de distúrbios de tensão.

Nos artigos (LIMA et al., 2012; LIMA ; MINUSSI, 2012) foi proposta uma nova abordagem para o problema de detecção e classificação de distúrbios de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica. Nestes trabalhos utilizaram-se conceitos dos sistemas imunológicos artificiais, em especial, o algoritmo de seleção negativa para realizar o diagnóstico de distúrbios de tensão. Partindo das oscilografias de tensão, medidas na subestação, aplica-se o algoritmo de seleção negativa para realizar a discriminação próprio/não-próprio. Os sinais classificados como próprios representam a operação normal do sistema, isto é, sem a presença de distúrbio, e os classificados como não-próprios são sinais onde existe a presença de anormalidade. A análise dos sinais é realizada através do janelamento das oscilografias onde são realizadas comparações entre os sinais e os detectores previamente criados, avaliando-se a afinidade entre as janelas. Caso a afinidade entre os sinais ultrapasse um limiar preestabelecido pelo operador, é encontrado um casamento, e o sinal é classificado. Estes trabalhos fazem parte desta pesquisa de mestrado, porém estes apresentam resultados preliminares, onde não é considerado o conceito de proporcionalidade no conjunto de detectores.

3.2 Sistemas imunológicos artificiais

Neste tópico apresentam-se as publicações mais relevantes para o desenvolvimento dos sistemas imunológicos artificiais.

Em Hoffmann (1986) é apresentada, de forma teórica, a proposta de um modelo para concepção de uma rede neural artificial inspirada no sistema imunológico biológico. Este trabalho é dado por muitos pesquisadores como o ponto chave para a difusão de um novo paradigma da teoria dos sistemas inteligentes.

Visando compreender o aprendizado e o reconhecimento de padrões do sistema imunológico biológico em (FORREST et al., 1993) foi proposto um modelo binário para estudar a diversidade e capacidade de generalização (sendo a generalização a capacidade de detecção) através de um algoritmo genético.

O artigo de Forrest et al. (1994) é um dos trabalhos pioneiros a propor uma aplicação, apresentando uma abordagem para detecção de vírus e violação de computadores utilizando um modelo que se assemelha ao sistema imunológico biológico. Esse trabalho utiliza o princípio da seleção negativa (discriminação próprio/não-próprio), descrevendo uma

estratégia para realizar a detecção de anormalidades em computadores. Ao utilizar conceitos da seleção negativa de linfócitos T, que ocorre dentro do timo, os autores propuseram um algoritmo que passou a ser conhecido na literatura como: “algoritmo de seleção negativa”.

SOmayaji et al. (1997) apresentaram, detalhadamente, o funcionamento de um sistema adaptativo baseado no sistema imunológico adaptativo. Nesse trabalho, foram propostas metáforas baseadas em comparações do sistema biológico com os sistemas computacionais que proporcionaram implementar características de segurança.

No artigo de Dasgupta e Attoh-Okine (1997) foi apresentada uma técnica imunoinspirada para classificar a atividade de uma rede de computadores como normal ou anormal. As técnicas são baseadas no processo de seleção negativa, no modelo da rede imunológica e na análise e diagnóstico de falhas.

Em (DASGUPTA, 1998) foram definidos os aspectos computacionais do sistema imunológico artificial e, partindo destes aspectos, foram propostas diversas aplicações, modelos e fenômenos decorrentes dos sistemas imunológicos biológicos. Este foi o primeiro livro editado sobre o assunto e proporcionou um grande impacto nas pesquisas.

No trabalho de Dasgupta e Forrest (1999) foi apresentado um algoritmo baseado nos sistemas imunológicos artificiais, em especial no algoritmo de seleção negativa para problemas relacionados a indústrias. Neste trabalho os autores apresentaram ideias e modelos para contornar problemas industriais aplicando conceitos imunológicos.

Em Dasgupta (1999) foi apresentado um modelo pioneiro de detecção de intrusos em redes de computadores usando conceitos dos sistemas imunológicos. Até este trabalho, a linha de pesquisa ainda era pouco difundida.

Um novo modelo para realizar a detecção distribuída visando à segurança computacional foi apresentado em Hofmeyr (2000). Neste trabalho, o autor definiu todas as propriedades organizacionais, hoje conhecidas sobre os sistemas imunológicos artificiais.

Em Castro e Von Zuben (2000) foi apresentado o algoritmo de seleção clonal (CLONALG) aplicado a problemas como reconhecimento de padrões, otimização multimodal e aprendizagem de máquina.

Uma nova abordagem utilizando uma rede imunológica para clusterização de dados foi apresentada em Castro e Von Zuben (2000b). A rede imunológica (aiNet) foi implementada em associação com uma inferência estatística. Este trabalho propôs uma alternativa às redes neurais artificiais.

Na tese de doutorado de Timmis (2000) foi apresentada uma técnica de análise de dados inspirada no sistema imunológico natural. Nesse trabalho foram definidos novos

conceitos para os sistemas imunológicos artificiais. O autor obteve bons resultados ao aplicar uma rede imunológica em dois conjuntos de dados.

Em Castro (2001) foi apresentado um novo paradigma dos sistemas imunológicos, chamado engenharia imunológica, onde o objetivo central é desenvolver ferramentas utilizando os princípios do sistema imunológico para resolver problemas do mundo real. Nesse trabalho, foram propostas quatro ferramentas: SAND, CLONALG, ABNET e aiNet. Destas quatro ferramentas, duas ganharam popularidade na literatura, sendo o algoritmo CLONALG e a rede imunológica aiNet. A partir deste trabalho os sistemas imunológicos artificiais ganharam notoriedade e foi mais difundido na literatura.

No artigo proposto por Castro e Von Zuben (2002) foi apresentada outra aplicação da ferramenta aiNet. Nesse trabalho a rede imunológica foi aplicada ao problema de mineração de dados.

No livro de (CASTRO; TIMMIS, 2002) foi apresentado um novo paradigma para a inteligência computacional utilizando os sistemas imunológicos artificiais. Esse livro é uma referência essencial para toda pesquisa realizada neste assunto, pois os autores abordaram todos os conceitos naturais e artificiais, definindo os novos padrões para este novo paradigma.

Em Cayzer e Aickelin (2002) foi proposto o modelo do perigo, um processo baseado no sistema imunológico inato, em especial na medula óssea. Este modelo foi comparado às demais teorias de sistemas imunológicos, principalmente em detecção de anomalias. O modelo do perigo é um complemento do algoritmo de seleção negativa, onde além do próprio e não-próprio, tem-se o falso próprio e falso não-próprio.

Uma revisão bibliográfica sobre computação natural foi apresentada em Castro et al. (2004). Este conceito trata das técnicas inspiradas na biologia ou fenômenos da natureza para o desenvolvimento de sistemas computacionais inteligentes, entre estas técnicas está o sistema imunológico artificial.

Após ser difundido o conceito de computação natural, muitas aplicações foram propostas, sendo algumas importantes para o desenvolvimento deste novo conceito. Podem-se destacar trabalhos como: Cazangi (2004) em que foi proposta a utilização de computação evolutiva no controle de navegação de robôs, em França (2005) foram aplicados os algoritmos bioinspirados visando a otimização dinâmica. Ferreira (2008) propôs ferramentas de aprendizado de máquina para previsão de perdas comerciais em redes de distribuição de energia elétrica, entre outros trabalhos.

Os autores Greensmith e Aickelin (2006) apresentaram uma nova abordagem para a detecção de intrusos em redes de computadores. Nesse trabalho, foi apresentado um método

baseado na função de células dendríticas. As células dendríticas são as células apresentadoras de antígenos para ativação do sistema imunológico biológico.

Em Greensmith (2007) foi apresentado de forma definitiva o algoritmo baseado no funcionamento das células dendríticas. As células dendríticas pertencem ao sistema imunológico inato, e são responsáveis pela resposta imune. Em certos casos quando a células emitem a resposta imune ocorre à supressão da mesma. Este processo é descrito como morte celular, uma característica apresentada no modelo do perigo.

No trabalho de Silva (2009) foi apresentado um algoritmo imunoinspirado baseado na teoria do perigo e as células dendríticas. O objetivo do trabalho foi realizar a detecção de intrusos em redes de computadores. Neste trabalho o autor propôs uma modificação aperfeiçoando o algoritmo apresentado em Greensmith (2007), diferentemente do algoritmo original o coeficiente de maturação do antígeno é atualizado em cada ciclo do algoritmo. Isto permite que o valor seja alterado, proporcionando mais precisão no diagnóstico.

3.3 Comentários

Nesta seção apresentou-se uma revisão bibliográfica sobre as metodologias utilizadas para diagnóstico de falhas em redes elétricas e sobre os sistemas imunológicos artificiais. Os trabalhos citados, nesta seção, correspondem aos mais relevantes encontrados na literatura especializada.

4 MODELAGEM E SIMULAÇÕES

A maior dificuldade em se realizar pesquisas na área de engenharia elétrica é a falta de um conjunto de dados consistentes dos sistemas de distribuição de energia elétrica sob o efeito de perturbações. Portanto, é necessária a modelagem de sistemas testes, nos quais se podem realizar simulações destes eventos (distúrbios de tensão, curtos-circuitos, entre outros), fornecendo dados a serem utilizados na avaliação das metodologias contribuindo para as pesquisas e a automação das subestações de energia elétrica.

Neste sentido, o software ATP/EMTP (ATP, 2007; EMTP-RV, 2011) pode ser uma excelente ferramenta, pois é um aplicativo próprio para simulações de transitórios eletromagnéticos. Através deste aplicativo é possível modelar sistemas elétricos reais, com o intuito de simular diversos problemas, visando gerar uma base de dados para avaliar metodologias.

Para este trabalho foi utilizado o software ATP/EMTP (DOMMEL, 1986; MEYER, 1973) para modelar quatro sistemas de distribuição de energia elétrica. Sendo três sistemas testes e um sistema real. Os sistemas modelados foram os seguintes:

- Sistema de 5 barras: Este é um sistema teste que possui 4 barras de carga, 1 subestação e 4 circuitos. Possui uma tensão base de 11,5 kV. As condições total de carga ativa e reativa são de 15,3 kW e 8,8 kVAr;
- Sistema de 33 barras: Este é um sistema teste que possui 32 barras de carga, 1 subestação e 32 circuitos. Possui uma tensão base de 12,66 kV. As condições total de carga ativa e reativa são de 3.715 kW e 2.315 kVAr;
- Sistema de 84 barras: Este é um sistema teste que possui 83 barras de carga, 1 subestação e 83 circuitos. Possui uma tensão base de 11,4 kV. As condições total de carga ativa e reativa são de 28.350 kW e 20.700 kVAr;
- Sistema de 134 barras: Este é um sistema real que possui 133 barras de carga, 1 subestação e 133 circuitos. Possui uma tensão base de 13,8 kV.

Após modelar os sistemas elétricos descritos anteriormente, foram feitas as simulações conforme descrito a seguir:

A frequência de amostragem utilizada nas simulações foi de 15,36 kHz, a qual corresponde a 256 amostras por ciclo. O tempo de simulação foi de 200 ms.

Para as simulações de distúrbios de tensão foi utilizado um modelo teórico proposto por Abdel-Galil et al. (2004), o qual é apresentado na tabela 1, na qual se tem as equações e os parâmetros utilizados para simulação de cada distúrbio.

No software ATP/EMTP (EMTP-RV, 2011) foi utilizada a rotina "models" apresentada por DUBÉ (1996), para modelar fontes geradoras para cada um dos tipos de distúrbios de tensão apresentados na tabela 1, sendo estas fontes responsáveis por fornecer tensão aos sistemas elétricos modelados.

Tabela 1 – Equações e parâmetros do modelo teórico.

Distúrbio	Equações	Parâmetros
Operação normal	$v(t) = A(sen(\omega t))$	-
Outage	$v(t) = A\left(1-\alpha\left(u\left(t-t_1\right)-u\left(t-t_2\right)\right)\right)sen\left(\omega t\right),\ t_1 < t_2,\ u(t) = \begin{cases} 0,\ t<0 \\ 1,\ t \geq 0 \end{cases}$	$0{,}9 \leq \alpha \leq 1$ $T \leq t_1 - t_2 \leq 12T$
Harmônico	$v(t) = A\begin{pmatrix} \alpha_1 sen(\omega t) + \alpha_3 sen(3\omega t) \\ +\alpha_5 sen(5\omega t) + \alpha_7 sen(7\omega t) \end{pmatrix}$	$\alpha_1 = 1$ $0{,}05 \leq \alpha_{3,5,7} \leq 0{,}15$
Swell	$v(t) = A\left(1+\alpha\left(u\left(t-t_1\right)-u\left(t-t_2\right)\right)\right)sen\left(\omega t\right),\ t_1 < t_2,\ u(t) = \begin{cases} 0,\ t<0 \\ 1,\ t \geq 0 \end{cases}$	$0{,}1 \leq \alpha \leq 0{,}8$ $T \leq t_1 - t_2 \leq 12T$
Sag	$v(t) = A\left(1-\alpha\left(u\left(t-t_1\right)-u\left(t-t_2\right)\right)\right)sen\left(\omega t\right),\ t_1 < t_2,$ $u(t) = \begin{cases} 0,\ t<0 \\ 1,\ t \geq 0 \end{cases}$	$0{,}1 \leq \alpha \leq 0{,}9$ $T \leq t_1 - t_2 \leq 12T$
Swell com Harmônico	$v(t) = A\left(1+\alpha\begin{pmatrix} u(t-t_1) \\ -u(t-t_2) \end{pmatrix}\right)\begin{pmatrix} \alpha_1 sen(\omega t) \\ +\alpha_3 sen(3\omega t) \\ +\alpha_5 sen(5\omega t) \end{pmatrix},\ t_1 < t_2,\ u(t) = \begin{cases} 0,\ t<0 \\ 1,\ t \geq 0 \end{cases}$	$\alpha_1 = 1$ $0{,}05 \leq \alpha_{3,5} \leq 0{,}15$ $0{,}1 \leq \alpha \leq 0{,}8$ $T \leq t_1 - t_2 \leq 12T$
Sag com Harmônico	$v(t) = A\left(1-\alpha\begin{pmatrix} u(t-t_1) \\ -u(t-t_2) \end{pmatrix}\right)\begin{pmatrix} \alpha_1 sen(\omega t) \\ +\alpha_3 sen(3\omega t) \\ +\alpha_5 sen(5\omega t) \end{pmatrix},\ t_1 < t_2,\ u(t) = \begin{cases} 0,\ t<0 \\ 1,\ t \geq 0 \end{cases}$	$\alpha_1 = 1$ $0{,}05 \leq \alpha_{3,5} \leq 0{,}15$ $0{,}1 \leq \alpha \leq 0{,}9$ $T \leq t_1 - t_2 \leq 12T$
Transitório Oscilatório	$v(t) = A\left(sen(\omega t) + be^{-\gamma(t-t_1)} sen\left(\omega_{tr}\left(t-t_1\right)\right)\right)$	$-2 \leq b \leq 2$ $50 \leq \gamma \leq 100$ $500\ \text{Hz} \leq f_{tr} \leq 1500\ \text{Hz}$

Fonte: (ABDEL-GALIL et al., 2004).

sendo:

Outage : interrupção do fornecimento de tensão;

Swell : elevação de tensão;

Sag : afundamento de tensão;

Ao total foram feitas 2528 simulações, sendo realizadas 632 simulações para cada um dos sistemas elétricos de 5, 33, 84 e 134 barras. Em todas as simulações foram considerados os seguintes itens:

- Variação nas fases A, B e C;
- Variação no carregamento do sistema, sendo considerado entre 50% a 120%;
- Os parâmetros, conforme a tabela 1.

Na tabela 2 apresentam-se a quantidade de simulações que foram realizadas para cada tipo de distúrbio de tensão e a operação normal, nos sistemas modelados.

Tabela 2 – Quantidade de simulações realizadas para cada sistema.

Distúrbio	Sistema			
	5 Barras	33 Barras	84 Barras	134 Barras
Operação normal	8	8	8	8
Outage	48	48	48	48
Harmônico	144	144	144	144
Swell	72	72	72	72
Sag	72	72	72	72
Swell com Harmônico	96	96	96	96
Sag com Harmônico	96	96	96	96
Transitório Oscilatório	96	96	96	96
Total	632	632	632	632

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tendo em vista que cada sistema elétrico ter sido simulado com oito carregamentos (de 50% a 120%) foi necessário simular o sistema em operação normal oito vezes, isto é, uma vez para cada carregamento.

A fim de manter um padrão nas simulações para cada sistema elétrico modelado, foi adotado um padrão nos valores dos parâmetros simulados. Portanto, as simulações para cada sistema elétrico têm as mesmas características.

Manter um padrão nas simulações permite gerar resultados confiáveis independentemente das características dos sistemas elétricos e também proporciona uma análise segura.

4.1 Comentários

Neste capítulo foram apresentados os sistemas elétricos utilizados para modelagem, o modelo teórico e a quantidade de simulações que foram realizadas em cada alimentador a fim de testar a metodologia proposta.

5 SISTEMAS IMUNOLÓGICOS ARTIFICIAIS

Neste capítulo é apresentada uma abordagem sobre os Sistemas Imunológicos Artificiais (SIA) e a Engenharia Imunológica (EI), enfocando os conceitos necessários para o entendimento dos modelos e algoritmos baseados nos SIA, bem como a proposta deste trabalho. Finalmente, apresentam-se diversas aplicações dos sistemas imunológicos artificiais e o algoritmo de seleção negativa (ASN).

5.1 Introdução

Há algumas décadas, alguns pesquisadores especializados em computação, começaram a observar e se inspirar em fenômenos da natureza para idealizar formas eficientes de resolver problemas em diversas áreas. Podem ser citados, como exemplo, as redes neurais artificiais (RNA), os algoritmos genéticos (AG), os algoritmos evolutivos (AE), a computação por DNA ou molecular, o comportamento de colônia de formigas, etc.

Entre as pesquisas inspiradas em fenômenos da natureza, destacam-se as que estudam os mecanismos biológicos de defesa do corpo humano, buscando conceitos e teorias capazes de proporcionar o desenvolvimento e concepção de novos algoritmos e técnicas para solução de problemas (CASTRO, 2001; CASTRO; TIMMIS, 2002).

Os Sistemas Imunológicos Biológicos (SIB) consistem num conjunto de células, moléculas e órgãos responsáveis pela defesa do corpo humano contra ataques de patógenos infecciosos (vírus, bactérias, fungos, protozoários e alguns tipos de vermes). Para garantir a proteção do organismo é necessário que o sistema tenha capacidade de distinguir moléculas e células do próprio corpo (*self*) das moléculas externas (*nonself*), o que é uma tarefa complexa, sendo assim a arquitetura do sistema imunológico biológico é composta por diversas funções e propriedades, as quais trabalham em conjunto, proporcionando agilidade na resposta aos agentes agressores (ABBAS; LICHTMAN, 2007).

Partindo destes conceitos foram propostas diversas arquiteturas e modelos aplicados de princípios imunológicos no desenvolvimento de ferramentas computacionais, que buscam representar as funcionalidades, propriedades e mecanismos dos sistemas imunológicos biológicos. Estas ferramentas são conhecidas como sistemas imunológicos artificiais (CASTRO, 2001).

Os sistemas imunológicos artificiais vêm sendo aplicados em diversas áreas, sendo que as principais delas são: reconhecimento de padrões, análise de dados e clusterização, segurança computacional, memórias associativas, programação e computação evolutiva, detecção de falhas e anomalias, otimização de processos, controle, robótica e aprendizagem de máquina (CASTRO, 2001).

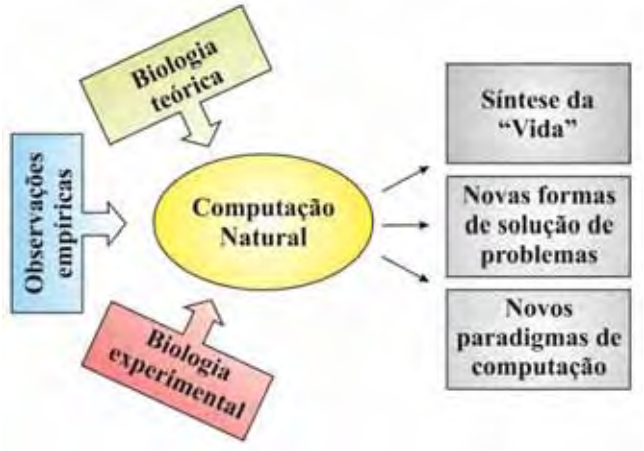
5.2 Formalização do conceito

A formalização do conceito de sistemas imunológicos artificiais se baseia em uma inspiração biológica. Ou seja, um conjunto de sistemas que são desenvolvidos com inspiração ou utilização de mecanismos naturais ou biológicos de processamento de informações. Esta técnica também é denominada Computação Natural (CASTRO et al., 2004).

A computação natural é subdividida em três linhas de pesquisas, estas subdivisões são apresentadas na figura 8, e são listadas a seguir (CASTRO et al., 2004):

1. Simulação de eventos naturais: Síntese da Vida;
2. Computação Bioinspirada: Novas formas de solução de problemas;
3. Computação com mecanismos naturais: Novos paradigmas de computação;

Figura 8 - Estrutura da computação natural.



Fonte: adaptado de (CASTRO, 2010).

O estudo de comportamentos, padrões, processos naturais e biológicos é a proposta da simulação de eventos naturais. Esta linha de pesquisa propõe o estudo da natureza no computador, que tem como destaque principalmente assuntos como a vida artificial e geometria fractal.

O estudo de ferramentas computacionais concebidas através de conceitos baseados em fenômenos naturais é a proposta da computação bioinspirada. Esta subdivisão da computação natural propõe estratégias inspiradas em mecanismos biológicos ou naturais com o objetivo de incluir as características, funcionalidades e propriedades biológicas ou naturais destes mecanismos nos sistemas desenvolvidos para resolver problemas. As principais abordagens pertencentes à computação bioinspirada são: as redes neurais artificiais (HAYKIN, 1994); a computação evolutiva (DARWIN, 1859; DARWIN; WALLACE, 1958); a inteligência de enxames (COLORNI et al., 1992); o comportamento de colônia de formigas (DORIGO et al., 1996), os algoritmos genéticos (HOLLAND, 1975) e os sistemas imunológicos artificiais (CASTRO, 2001; CASTRO; TIMMIS, 2002), que será abordado neste trabalho.

Os novos paradigmas de computação são baseados em influências de elementos biológicos nos sistemas de inteligência computacional. Os elementos biológicos possuem diversas características e propriedades específicas para resolver problemas e cumprir objetivos, tais como (CASTRO, 2001):

- memória;
- organização;
- aprendizado;
- adaptação;
- robustez;
- tolerância;
- diversidade.

Estas características e propriedades são importantes e essenciais no desenvolvimento e concepção de novos paradigmas da computação.

Algumas destas características e propriedades estão presentes nos sistemas imunológicos biológicos e muitas delas tornaram-se a motivação da existência dos sistemas imunológicos artificiais, principalmente sua capacidade de combater os agentes agressores e proporcionar a defesa do organismo.

Um detalhe a ser ressaltado é que a computação natural não busca imitar a biologia, mas sim, inspirar-se, visando conceber algoritmos e ferramentas computacionais capazes de resolver problemas utilizando conceitos, funcionalidades e propriedades dos fenômenos biológicos ou naturais. (CASTRO et al., 2004).

5.3 Visão geral do sistema imunológico Biológico

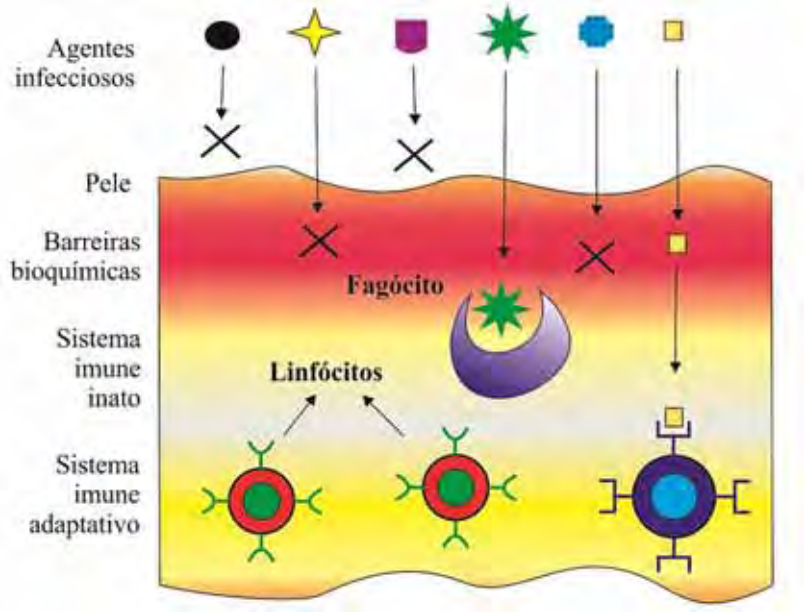
Para abranger todo o organismo o sistema imunológico biológico utiliza um conceito chamado de detecção distribuída, ou seja, por todo o organismo existem detectores distribuídos buscando identificar agentes infecciosos agressores. Como consequência desse conceito de detecção distribuída o sistema imunológico biológico consegue distinguir entre os elementos próprios, que são elementos do organismo, e os não-próprios, que são elementos estranhos, desconhecidos pelo sistema.

A eficiência do sistema imunológico depende diretamente da habilidade de detectar elementos não-próprios nocivos ao sistema. Como citado em (HOFMEYR; FORREST, 1999) esta é uma tarefa muito complexa, por causa aos seguintes fatores:

- o número de padrões não-próprios no organismo humano (aproximadamente 10^{16}) é bem maior que o número de padrões próprios (aproximadamente 10^{6});
- o ambiente é altamente distribuído;
- o organismo deve continuar funcionando;
- os recursos disponíveis para combater os agentes infecciosos agressores são escassos.

Para contornar este problema, o sistema imunológico biológico é disposto de forma distribuída, em várias camadas de defesa no corpo humano, como ilustrado na figura 9.

Figura 9 – Camadas de defesa do sistema imunológico biológico.



Fonte: adaptado de (CASTRO, 2001).

A primeira camada de proteção do corpo humano é a pele. Ela funciona como uma barreira contra infecções. A segunda camada de proteção é uma barreira bioquímica, onde as condições fisiológicas são impróprias para a sobrevivência de organismos estranhos (ABBAS et al., 2008).

Quando os agentes infecciosos conseguem entrar no corpo, ultrapassando as duas primeiras barreiras, eles são combatidos pelo sistema imune inato ou pelo sistema imune adaptativo. O sistema imune inato é constituído de células capazes de digerir certos tipos de moléculas e materiais biológicos, limpando o organismo, por exemplo, agentes infecciosos que já foram neutralizados e ainda estão no organismo. Já o sistema imune adaptativo é responsável pela imunidade adquirida durante a vida do organismo, ou seja, ao longo da vida, quando o sistema é exposto a agentes infecciosos o sistema imune adaptativo deve agir tomando as decisões necessárias para gerar uma resposta e neutralizar este agente desconhecido. É no funcionamento destes processos que se concentram as maiores pesquisas para desenvolvimento de novas abordagens, pois a adaptabilidade pode oferecer melhores soluções para os problemas (ABBAS et al., 2008).

O sistema imunológico biológico é um assunto muito interessante e serve de base para todos os conceitos artificiais. Na literatura encontram-se diversos trabalhos que apresentam abordagens biológicas dos sistemas imunológicos, bem como, livros de biologia que tratam especificamente deste assunto.

Neste sentido, neste trabalho apresentam-se anexos, os quais possuem conceitos biológicos que foram extraídos ou adaptados de literaturas relevantes, visando facilitar a leitura e entendimento de usuários que necessitem de tais conceitos. No Anexo A é apresentada a anatomia dos sistemas imunológicos biológicos. No Anexo B é apresentado o processo de descriminação próprio/não-próprio do sistema imunológico e, por fim, no Anexo C, encontram-se as propriedades dos sistemas imunológicos biológicos.

5.4 Os Sistemas Imunológicos Artificiais

Como já apresentado neste trabalho, a linha de pesquisa relacionada à computação inspirada na natureza, chamada de computação natural, é composta por várias técnicas, algumas bastantes conhecidas, técnicas que se mostraram eficazes na resolução de alguns problemas.

Uma nova linha de pesquisa, que também busca na natureza a inspiração para resolução de problemas do mundo real, é o sistema imunológico artificial. Nesta linha são

extraídos conceitos dos processos exercidos pelo sistema imunológico biológico, sendo realizada uma analogia entre os componentes biológicos (anticorpos, células, moléculas e órgãos) (DASGUPTA, 1998).

Os sistemas imunológicos artificiais, tendo como base um processo natural, são aplicados na resolução de problemas. Os processos exercidos, relevantes ao aspecto em que o problema se identifica, são modelados de modo que a analogia seja criada, e o problema possa ser resolvido, levando em consideração, as vantagens oferecidas pelos princípios biológicos.

Nos últimos vinte anos, a imunologia artificial se consolidou. Muitos trabalhos relevantes foram apresentados e surgiram algumas definições para os sistemas imunológicos artificiais, como descritos a seguir (DASGUPTA, 2006):

Definição 1: "Os Sistemas imunológicos Artificiais são metodologias de manipulação de dados, classificação, representação e raciocínio que seguem um paradigma biológico plausível: o sistema imunológico humano" (HOFMEYR, 2000).

Definição 2: "Um sistema imunológico artificial é um sistema computacional baseado em metáforas do sistema imunológico natural" (TIMMIS, 2000).

Definição 3: "Os sistemas imunológicos artificiais são compostos por metodologias inteligentes, inspiradas no sistema imunológico biológico, para a solução de problemas do mundo real" (DASGUPTA, 1998).

Uma nova abordagem para os sistemas imunológicos artificiais foi proposta na tese de doutorado de (CASTRO, 2001), uma referência essencial para qualquer pesquisa relacionada a este assunto. Em seu trabalho é apresentado um novo modelo, chamado de engenharia imunológica (CASTRO, 2001).

Segundo Castro (2001) pode-se definir a engenharia imunológica como sendo um processo de metassíntese, o qual vai definir a ferramenta de solução de um determinado problema baseado nas características do próprio problema, e depois aplicá-las na obtenção da solução. Ao invés de buscar a reconstrução parcial ou total do sistema imunológico tão fielmente quanto possível, a engenharia imunológica deve procurar desenvolver e implementar modelos pragmáticos inspirados no sistema imunológico que preservem algumas de suas propriedades essenciais e que se mostrem passíveis de implementação computacional e eficazes no desenvolvimento de ferramentas de engenharia.

É evidente que a proposta visa modelar genericamente os componentes do sistema imunológico para a formalização e desenvolvimento de ferramentas de engenharia imunológica. Vale ressaltar que o objetivo central da engenharia imunológica é estudar um único tipo celular, as células B, e mecanismos de reconhecimento (CASTRO, 2001).

5.4.1 Representação celular e afinidade

Neste tópico apresenta-se a forma de representação de um antígeno (*Ag*) e um anticorpo (*Ab*), e como ocorre a interação entre eles.

Um antígeno (*Ag*) é representado pela equação (1) e o anticorpo (*Ab*) pela equação (2) (de CASTRO, 2001).

$$Ag = Ag_1, Ag_2, Ag_3, Ag_4, ..., Ag_L \tag{1}$$

$$Ab = Ab_1, Ab_2, Ab_3, Ab_4, ..., Ab_L \tag{2}$$

sendo:

L: dimensão do espaço do antígeno e do anticorpo.

Todo processo biológico de defesa do corpo humano se baseia na interação entre um antígeno e um anticorpo, ou seja, quando existe uma combinação, ou como também conhecido, um casamento entre os dois elementos, pode-se dizer que um agente agressor foi reconhecido pelo sistema e será combatido até ser neutralizado. Biologicamente falando, a combinação entre um antígeno e um anticorpo não ocorre somente de forma perfeita. Existe um limiar, um valor mínimo para que um anticorpo reconheça um antígeno.

Este limiar, ou valor mínimo de semelhança entre o antígeno e o anticorpo é denominado taxa de afinidade. A taxa de afinidade representa o grau de semelhança/similaridade que deve existir entre os elementos biológicos para existir uma combinação (casamento) (DASGUPTA, 2006).

Uma propriedade muito interessante dos anticorpos que deve ser destacada é a capacidade de reconhecer diversos antígenos, o que ocorre em consequência da taxa de afinidade. Desta forma, um anticorpo é capaz de reconhecer vários antígenos que possuam um valor de afinidade maior que o seu próprio limiar (HOFMEYR, 2000).

Uma vez conhecendo a taxa de afinidade, apresenta-se a relação entre o antígeno e o anticorpo, que é dada pela distância entre eles. A distância (*D*) pode ser definida como a semelhança entre os dois elementos, e pode ser calculada de duas maneiras, sendo a fórmula de Euclides, ou a fórmula de Manhattan, como descrito em (3) e (4) respectivamente (CASTRO, 2001):

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^{L} (Ab_i - Ag_i)^2} \tag{3}$$

$$D = \sum_{i=1}^{L} \left| Ab_i - Ag_i \right| \quad (4)$$

Se esta distância *D* for superior ou igual a um limiar pré-estabelecido de afinidade, então ocorre uma combinação (casamento) entre as moléculas, ou seja, as duas são consideradas iguais. Para utilizar estas maneiras de calcular a afinidade entre as amostras é necessário que o problema esteja codificado em um vetor binário (CASTRO, 2001). Neste trabalho será utilizada a definição de casamento (combinação) e afinidade proposta por BRADLEY; TYRRELL (2002). Esta teoria se encaixa melhor em análise de valores nominais e proporciona um maior dinamismo no diagnóstico. Os conceitos propostos em Bradley e Tyrrell (2002) serão apresentados mais a frente em conjunto com o algoritmo de seleção negativa.

5.4.2 Maturação e afinidade

Visando cobrir adequadamente todos os padrões não-próprios, o sistema imunológico trabalha com a detecção distribuída, onde uma grande diversidade de detectores esta espalhada pelo sistema. Isto permite que o sistema detecte praticamente qualquer tipo de agente infeccioso.

Para garantir toda esta eficiência o sistema imunológico é dotado de um método capaz de reproduzir linfócitos com grande afinidade para agentes específicos, ou seja, é capaz de gerar inúmeras replicas de linfócitos prontos para neutralizar ameaças específicas. Este processo é chamado de maturação e afinidade (CASTRO, 2001).

A maturação e afinidade faz uso de um subconjunto de linfócitos chamados de células B, isto é, células maturadas na medula óssea (*bone marrow*). Quando estas células são ativadas, através da combinação com um antígeno, inicialmente ela libera outros anticorpos no sistema, que são capazes de realizar a combinação a outros agentes infecciosos do mesmo tipo, acelerando o processo de neutralização da ameaça. Em seguida, as células B são clonadas, porém as cópias das células não são idênticas à célula original, por causa da existência de mutação com altos níveis de afinidade, que é chamada de hipermutação somática. O fato das células filhas serem diferentes da célula mãe, não impede a capacidade destas células se combinarem com outros agentes infecciosos, e por sua vez serem ativadas, liberando os anticorpos e posteriormente serem clonadas. A probabilidade de uma célula ser

clonada esta relacionada diretamente com a afinidade, pois quanto maior for a afinidade com os agentes infecciosos, maior a chance de a célula ser ativada e clonada (CASTRO, 2001).

Uma vez que a célula B foi ativada, sendo combinada com um agente infeccioso ela é clonada, e isto garante que ela continue vivendo no organismo, as células que não são clonadas morrem. Todo este processo é conhecido como maturação e clonagem, que indiretamente proporciona uma competição entre as células B, forçando uma busca incessante por agentes infecciosos no organismo, visando serem replicadas, para evitar a morte celular. À medida que a população de células B são maturadas, elas são evoluídas se tornando células B mais eficientes para detectar e capturar os agentes no sistema (SILVA, 2009).

5.4.3 Memória imunológica

Quando o sistema imunológico combate um agente agressor, através de uma resposta imunológica bem sucedida, resulta na proliferação de células B que possuem alto nível de afinidade com o agente agressor, ou seja, são distribuídas pelo organismo células B prontas para neutralizar o agente agressor. Porém estas células tem um período de vida bastante reduzido, e uma vez que o objetivo é comprido o agente agressor é eliminado, e as células B desaparecem do organismo. O que significa que, caso ocorra novamente uma infecção do mesmo tipo, o sistema terá que realizar outro processo de maturação e afinidade, gerando novos anticorpos para neutralizar novamente a ameaça (CASTRO, 2001).

Para evitar todo este trabalho desnecessário o sistema imunológico guarda uma memória das informações codificadas nestas células B, o que é conhecido como memória imunológica. A memória imunológica proporciona agilidade na resposta a agentes que o sistema já foi exposto (CASTRO, 2001).

A memória imunológica também é conhecida como resposta secundária, ou seja, uma vez que o sistema já conhece o agente agressor, pode fornecer uma resposta rápida e específica neutralizando a ameaça (SILVA, 2009).

5.5 Propriedades dos sistemas imunológicos artificiais

Os sistemas imunológicos biológicos possuem diversas propriedades a serem exploradas e serem incorporadas nos sistemas imunológicos artificiais. Muitas destas propriedades são temas de pesquisas, e podem proporcionar aos sistemas computacionais muita eficiência, desempenho e qualidade.

Como ressaltado por Dasgupta (1998), a seguir encontram-se as propriedades dos sistemas imunológicos biológicos a serem exploradas por pesquisas.

- unicidade;
- universalidade;
- robustez;
- autonomia;
- auto-organização;
- organização multicamadas;
- reconhecimento de padrões (tolerância e reatividade);
- maturação e afinidade (otimização);
- distributividade;
- memória / memória associativa;
- aprendizado por reforço;
- comportamento presa-predador;
- tolerância a ruído (reconhecimento imperfeito);
- coerência sob fluxo de matéria, energia e informação.

Todas as propriedades são explicadas no Anexo C, presente no final neste trabalho.

5.6 Aplicações dos sistemas imunológicos artificiais

A seguir são listadas aplicações dos sistemas imunológicos e engenharia imunológica com destaque para os trabalhos mais importantes para suas respectivas áreas de aplicação:

- **Reconhecimento de padrões**:
  - (HUNT et al., 1998);
  - (FORREST et al., 1993);
  - (DASGUPTA; FORREST, 1999);
- **Segurança computacional**:
  - (FORREST et al., 1994);
  - (DASGUPTA, 1999);
- **Robótica**:
  - (JUN et al., 1999);
  - (LEE et al., 1999);

- **Otimização**:
  - (FUKUDA et al., 1998);
  - (CASTRO; VON ZUBEN, 2000);
- **Controle**:
  - (BERSINI, 1991);
  - (KRISHNA et al., 1995);
- **Detecção de falhas e anomalias**:
  - (FORREST et al., 1994);
  - (DASGUPTA; FORREST, 1999);
- **Aprendizagens de máquina**:
  - (HIGHTOWER et al., 1996);
- **Autômatos celulares:**
  - (CELADA; SEIDEN, 1992);
- **Mineração de Dados (*Data mining*)**:
  - (HUNT et al., 1995);
  - (CASTRO; VON ZUBEN, 2002);
- **Análise de dados (Agrupamento, compactação)**:
  - (de CASTRO; VON ZUBEN, 2000b);

5.7 Algoritmo de seleção negativa

O Algoritmo de Seleção Negativa (ASN) é uma técnica que se baseia no processo de reconhecimento de padrões exercido pelo sistema imunológico biológico, sendo elaborado como um modelo computacional. O ASN foi proposto por Forrest et al. (1994), para detecção de mudanças em sistemas computacionais. Este algoritmo é baseado na seleção negativa de linfócitos T dentro do timo, este processo representa a discriminação que o organismo realiza com as células, entre próprias e não-próprias. O algoritmo é executado em duas fases, como descrito a seguir (CASTRO, 2001):

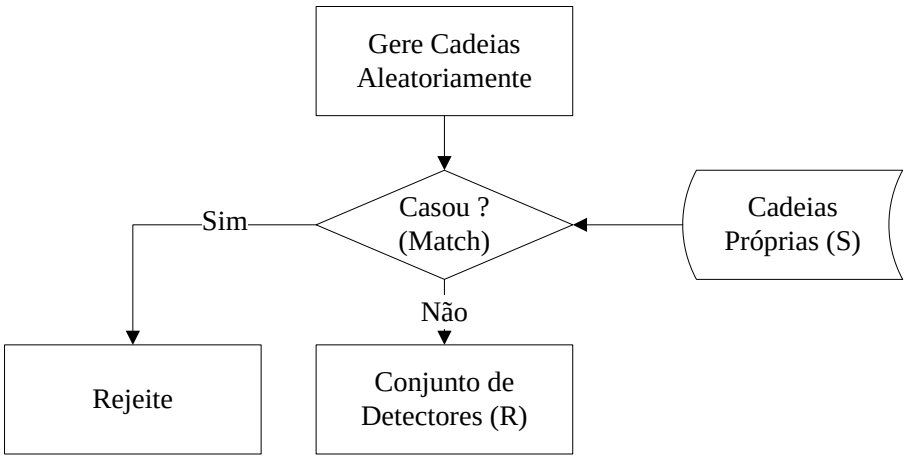
1. Censoriamento
   a) Definir o conjunto de cadeias próprias (S) que se deseja proteger;
   b) Gerar cadeias aleatórias e avaliar a afinidade (*match*) entre cada uma delas e as cadeias próprias. Caso a afinidade seja superior a um limiar estipulado, rejeitar a cadeia. Caso contrário, armazene-a em um conjunto de detectores (R).

2. Monitoramento

a) Dado o conjunto de cadeias que se deseja proteger (cadeias protegidas), avaliar a afinidade entre cada uma delas e o conjunto de detectores. Se a afinidade for superior a um limiar preestabelecido, então um elemento não-próprio é identificado.

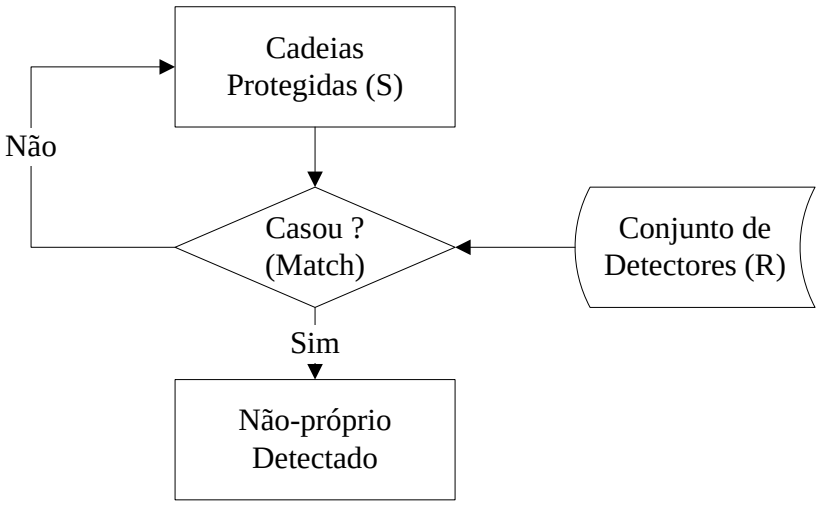
As figuras 10 e 11 ilustram os fluxogramas da fase de censoriamento e monitoramento do algoritmo de seleção negativa.

Figura 10 - Fluxograma da fase de censoriamento do ASN.



Fonte: Adaptado de (CASTRO, 2001).

Figura 11 - Fluxograma da fase de monitoramento do ASN.



Fonte: Adaptado de (CASTRO, 2001).

Na fase de censoriamento do ASN, são definidos, inicialmente, os detectores próprios, que representam uma condição normal do organismo, sendo conhecidos como cadeias próprias (S). O objetivo desta fase é gerar um conjunto de padrões detectores (R), que tenham

a capacidade de reconhecer algum padrão não-próprio, na fase de monitoramento dos dados. Então, a partir da leitura dos dados, escolhem-se cadeias aleatoriamente e verifica-se a afinidade comparando estas cadeias ao conjunto de cadeias próprias (S). Supondo que a afinidade seja superior a um limiar preestabelecido, rejeita-se a cadeia. Caso contrário, esta cadeia é aceita no conjunto de detectores (R), e será utilizada para fazer as classificações durante o monitoramento dos dados. Os detectores são análogos às células do tipo T maturadas capazes de reconhecer agentes patogênicos, isto é, detectar praticamente qualquer elemento não-próprio, uma modificação ou erro nos dados que se deseja monitorar.

Na fase de monitoramento, faz-se um monitoramento nos dados visando identificar mudanças no comportamento das amostras e, então, classificar estas mudanças utilizando o conjunto de detectores criados na fase de censoriamento. Assim, analisando-se as cadeias protegidas (S) e comparando-as com o conjunto de detectores (R), avalia-se a afinidade entre cada uma das cadeias. Caso a afinidade entre as cadeias seja superior a um determinado limiar, então, um elemento não-próprio é detectado e classificado. Ressalta-se que as fases de censoriamento e de monitoramento são realizadas de modo *off-line* e em tempo real, respectivamente (CASTRO; TIMMIS, 2002).

Algumas observações podem ser feitas sobre o algoritmo de seleção negativa, assim destacadas (DASGUPTA, 2006; CASTRO, 2001; FORREST et al., 1997):

- o tamanho do conjunto de detectores não cresce necessariamente com o número de cadeias a serem protegidas (CASTRO, 2001);
- a probabilidade de detecção de anomalias aumenta exponencialmente com a quantidade de algoritmos de detecção independente (CASTRO, 2001; DASGUPTA, 2006);
- a detecção é simétrica, isto é, os padrões que se assemelham ou tenham simetria entre si, são considerados casados, portando a detecção depende da simetria entre as cadeias em análise (CASTRO, 2001; FORREST et al., 1997);
- existe um custo exponencial de geração de detectores em relação ao tamanho do conjunto de cadeias a serem protegidas (próprio), isto porque a geração aleatória das cadeias do conjunto R leva a geração repetida de diversas cadeias (CASTRO, 2001).

5.8 Critério de casamento e taxa de afinidade

Para avaliar a afinidade entre as cadeias (antígeno e anticorpo) e comprovar que elas são semelhantes, utiliza-se um critério conhecido como casamento, que tem o mesmo significado que combinação. O casamento pode ser perfeito ou parcial. Por este método não é necessário transformar o problema em binário, utilizam-se os valores nominais.

O casamento perfeito é quando as duas cadeias, que estão sendo analisadas, possuem os mesmos valores em todas as posições, ou seja, as duas cadeias necessariamente devem ser perfeitamente iguais. Já no casamento parcial não existe a necessidade de que todas as posições dos padrões tenham o mesmo valor. No casamento parcial, apenas uma quantidade de posições entre os padrões deve ter o mesmo valor para se confirmar o casamento, sendo esta quantidade definida previamente. Esta quantidade é conhecida como a taxa de afinidade.

Neste artigo, foi optar por utilizar o conceito de casamento parcial e afinidade proposto em por Bradley; Tyrrell (2002), visto que se trabalha com os valores nominais de tensão.

A taxa de afinidade representa o grau de semelhança necessário para ocorrer o casamento entre as duas cadeias em análise. No artigo de Bradley e Tyrrell (2002) a taxa de afinidade é definida através da seguinte relação:

$$TAf = \left(\frac{An}{At} \right) * 100 \tag{5}$$

sendo:

TAf : taxa de afinidade;

An : número de cadeias normais no problema (cadeias próprias);

At : número total de cadeias no problema (cadeias próprias e não-próprias).

Através da equação (5) é possível quantificar de forma correta o valor da taxa de afinidade para o problema proposto, onde a relação (5) propõe uma relação estatística entre todas as amostras do problema.

Como mencionado anteriormente, para verificar a combinação entre os sinais será utilizado o conceito de casamento parcial também proposto por (BRADLEY; TYRRELL 2002). Neste caso, não se mede a distância entre o antígeno e o anticorpo para quantificar a afinidade entre os dois padrões, utiliza-se o conceito apresentado a seguir.

Para dar mais dinamismo ao diagnóstico foi proposto um desvio vinculado ao anticorpo (padrão detector), isto é, uma tolerância para mais e para menos, a qual é possível

aceitar a combinação entre os padrões. Como apresentado na equação (6). Este desvio atua individualmente em cada posição *i* do vetor, permitindo verificar o casamento em cada posição.

$$\underline{Ab}_i \leq Ag_i \leq \overline{Ab}_i \tag{6}$$

Sendo:

Ag_i : valor nominal da posição *i* do antígeno (padrão em análise);

$\underline{Ab}_i$: valor nominal da posição *i* menos o desvio adotado no anticorpo (padrão detector);

$\overline{Ab}_i$: valor nominal da posição *i* mais o desvio adotado no anticorpo (padrão detector).

Desta forma se o valor da posição *i* do antígeno estiver no intervalo expresso em (6) considera-se o casamento para esta posição. Assim é possível quantificar a afinidade entre os padrões, analisando posição por posição. A expressão (7) representa a afinidade total entre os dois padrões em análise (BRADLEY; TYRRELL, 2002):

$$Af_T = \frac{\sum_{i=1}^{L} Pc}{L} * 100 \tag{7}$$

sendo:

Af_T : % de afinidade entre os padrões analisados;

L : quantidade total de posições;

Pc : posição casada;

$\sum_{i=1}^{L} Pc$: somatória (quantidade) das posições casadas.

Portanto se Af_T for maior ou igual a TAf ocorre o casamento entre os dois padrões, ou seja, os dois são considerados semelhantes. Caso a Af_T seja menor que a TAf o anticorpo (detector) não reconhece o antígeno, portanto não existe casamento entre os sinais.

5.9 Comentários

Nesta seção foram apresentados os conceitos dos sistemas imunológicos artificiais e a Engenharia Imunológica (EI), enfocando os conceitos necessários para o entendimento dos modelos e algoritmos baseados nos SIA, bem como a proposta deste trabalho. Finalmente,

apresentam-se diversas aplicações dos sistemas imunológicos artificiais e o algoritmo de seleção negativa (ASN).

6 METODOLOGIA PROPOSTA

Neste capítulo apresenta-se uma descrição da metodologia proposta para detecção e classificação de distúrbios de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando conceitos baseados nos sistemas imunológicos artificiais, em especial o algoritmo de seleção negativa.

Na sequência encontra-se o sistema de diagnóstico de distúrbios de tensão desenvolvido neste trabalho, destacando os principais passos e conceitos para o entendimento do mesmo.

6.1 Sistema de diagnóstico de distúrbios de tensão

O sistema de diagnóstico de distúrbios de tensão apresentado nesta seção é baseado nos sistemas imunológicos artificiais, em especial o algoritmo de seleção negativa, que foi apresentado no capítulo 6 deste trabalho. Tendo como base este algoritmo, o sistema de diagnóstico é composto por duas fases, sendo o censoriamento e o monitoramento dos dados. Na fase de censoriamento realiza-se um censo nos dados, criando um conjunto de detectores, para identificação das anomalias no processo de monitoramento.

Na fase de monitoramento os dados são analisados em tempo real, sendo comparados com o conjunto de detectores criados na fase de censoriamento, visando apresentar um diagnóstico através da discriminação próprio/não-próprio.

A seguir apresentam-se as fases de censoriamento e monitoramento dos dados do sistema de diagnóstico de distúrbios de tensão proposto neste trabalho.

6.1.1 Cálculo da taxa de afinidade

Para este trabalho será utilizado o conceito de casamento e afinidade apresentado em (BRADLEY; TYRRELL,(2002). Para calcular a taxa de afinidade utiliza-se a definição apresentada na equação (5).

Para realizar o cálculo da taxa de afinidade para este sistema, levam-se em conta os seguintes aspectos:

- a análise realizada pelo sistema imunológico artificial é individualizada por fase do sistema elétrico, ou seja, cada fase precisa ter um conjunto de detectores;

- os dados simulados são de sistemas elétricos trifásicos, portanto a cada simulação uma fase do sistema elétrico apresenta perturbações e as outras duas apresentam operação normal.

Sendo assim, a taxa de afinidade deve ser calculada com base nas informações de cada fase do sistema elétrico, então considerando esta informação é possível obter os parâmetros At e An para se calcular a taxa de afinidade. Sendo o número total de simulações (At) e um número de simulações sem perturbações (An), (sinais próprios).

Levando em consideração as simulações apresentadas no capítulo 4, para cada sistema elétrico, obtêm-se os seguintes valores: At = 624 e An = 416.

O cálculo da taxa de afinidade é apresentado na equação (8) a seguir:

$$TAf = \left(\frac{416}{624}\right) * 100 = 66{,}6\% \tag{8}$$

O valor da taxa de afinidade é de 66,6%, isto significa que para confirmar um casamento entre dois sinais é necessário que no mínimo 66,6% dos pontos detectores sejam casados.

Deve-se ressaltar que a afinidade pode ser calculada com base em um cálculo estatístico, como apresentado neste tópico, ou simplesmente é possível escolher um valor arbitrário. Não existe nenhuma regra para definir a afinidade necessária para se confirmar um casamento, pois a cada tipo de problema existe um contexto diferente.

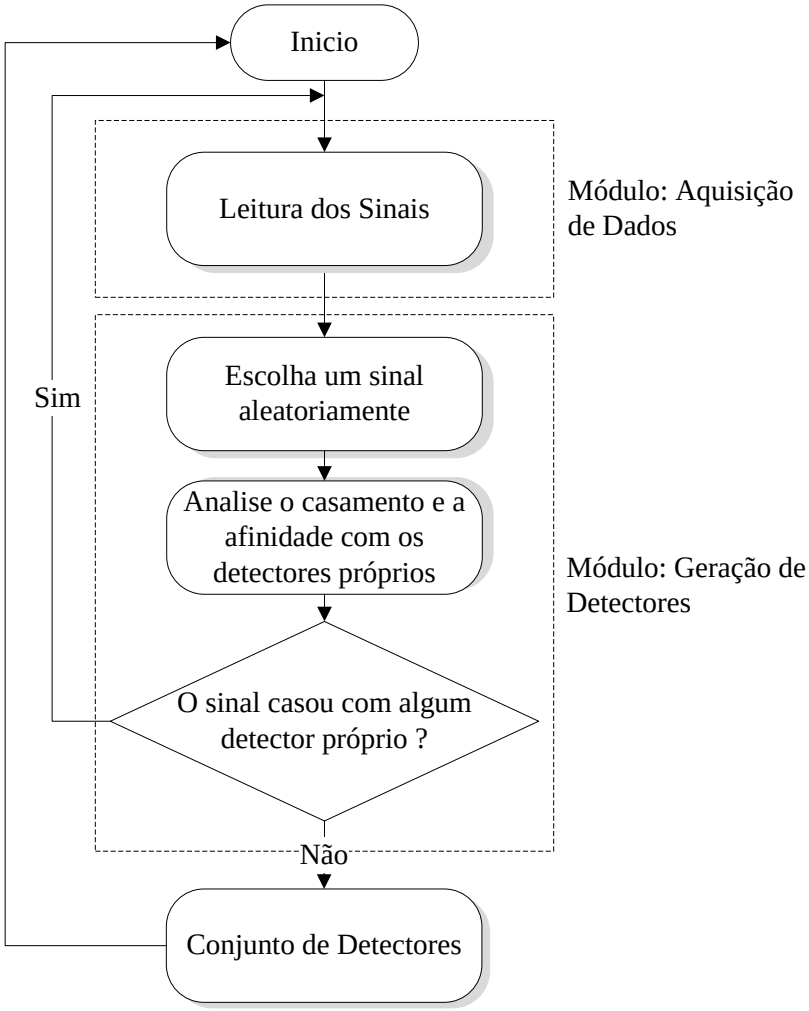
Nos resultados presentes neste trabalho será apresentada uma análise com o valor da taxa de afinidade.

6.1.2 Fase de censoriamento

A fase de censoriamento do sistema de diagnóstico de distúrbios de tensão tem como função gerar o conjunto de detectores (anticorpos artificiais) para serem utilizados pelo sistema imunológico artificial durante o processo de monitoramento dos dados. Esta fase é realizada em modo *off-line* e individualizada por fase do sistema elétrico, portanto têm-se três sistemas imunológicos artificiais, cada qual com seu conjunto de detectores.

A fase de censoriamento do sistema é subdividida em dois módulos essenciais, sendo o módulo de aquisição de dados e o módulo de geração de detectores. Na figura 12 apresenta-se um diagrama simplificado do funcionamento da fase de censoriamento do sistema de diagnóstico.

Figura 12 – Diagrama de módulos da fase de censoriamento.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

O módulo de aquisição de dados faz a leitura das oscilografias de tensão medidas na subestação para as três fases (via sistema de aquisição de dados (SCADA)). A taxa de amostragem utilizada é de 15,36 kHz, a qual corresponde a 256 amostras por ciclo.

Partindo da leitura deste sinal, o módulo de geração de detectores é responsável por criar um conjunto de detectores que representem o sistema sob o efeito do distúrbio, para que sejam utilizados na fase de monitoramento de dados.

Então inicialmente na fase de censoriamento são criados os detectores próprios do sistema, isto é, os sinais que devem ser protegidos (sinais próprios). No caso de um sistema de distribuição de energia elétrica, os sinais próprios têm as características de operação normal do sistema, ou sem perturbações. Então para gerar os detectores próprios faz-se um janelamento nos sinais com características próprias, e armazena-se uma janela (256 pontos)

do sinal como detector. As amostras armazenadas como detectores próprios serão utilizadas para verificar a afinidade (semelhança) com os sinais não-próprios (distúrbios) para geração do conjunto de detectores de distúrbios.

Na sequência após gerar o conjunto de detectores próprios, o módulo de censoriamento pode ser executado, visando gerar os detectores dos distúrbios, lembrando que o módulo é executado individualmente para cada tipo de distúrbio.

Nesta fase os detectores são gerados aleatoriamente partindo de um conjunto de sinais que representam o sistema sob o efeito do distúrbio. Assim, é realizado um janelamento de 1 ciclo (256 pontos) nos dados simulados (pertencentes a um único tipo de distúrbio), e estes dados são analisados, janela por janela, sendo comparados com os detectores próprios para verificar se combinam com algum sinal próprio. Se um casamento com o detector próprio é encontrado o sinal aleatório é rejeitado. Caso contrário, é aceito, sendo armazenada a janela encontrada como padrão detector no conjunto de detectores para o distúrbio em questão. Esse processo é repetido até que um número desejado de detectores seja obtido para cada distúrbio.

Todo este processo é executado visando gerar um conjunto de padrões detectores para cada tipo de distúrbio e armazenar na memória para realizar a classificação no processo de monitoramento.

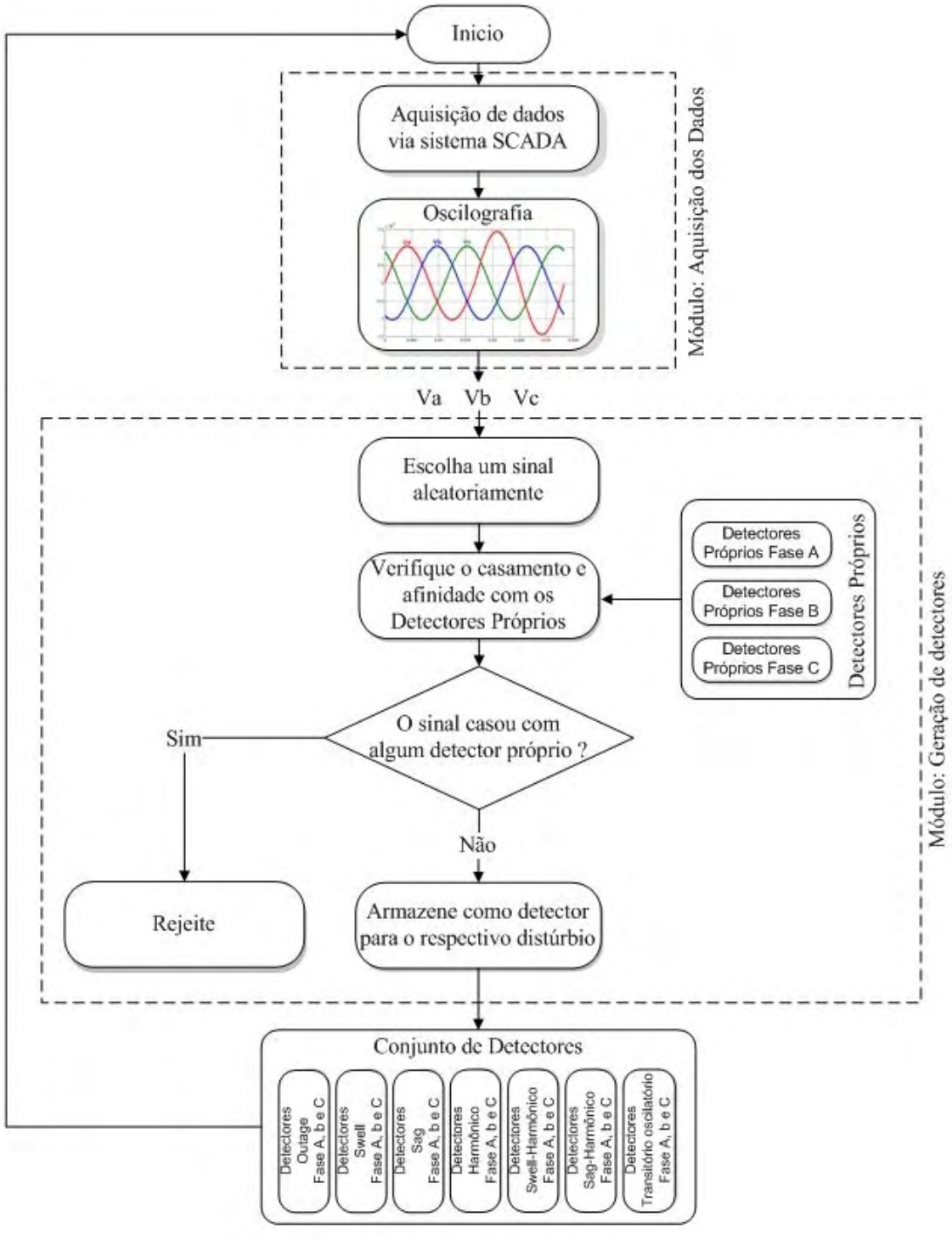
A fase de censoriamento pode ser descrita nos passos a seguir:

- 1º Passo: Defina o valor da taxa de afinidade e do desvio ε;
- 2º Passo: Criar um conjunto de detectores próprios;
- 3º Passo: Realizar a leitura dos sinais (para cada tipo de distúrbio, realizar uma leitura);
- 4º Passo: Escolher um sinal aleatoriamente;
- 5º Passo: Verifique a afinidade e o casamento entre o sinal e o conjunto de detectores próprios. Caso seja encontrado um casamento, rejeite o sinal. Caso contrário, armazene o sinal como detector no conjunto de detectores;
- 6º Passo: O número de detectores que se desejava gerar já foi atingido? Se sim, pare. Caso contrário, volte ao 4º passo.

Estes passos são repetidos para cada tipo de distúrbio utilizado no sistema de diagnóstico.

Os passos apresentados anteriormente são ilustrados no fluxograma apresentado na figura 13.

Figura 13 – Fluxograma da fase de censoriamento.



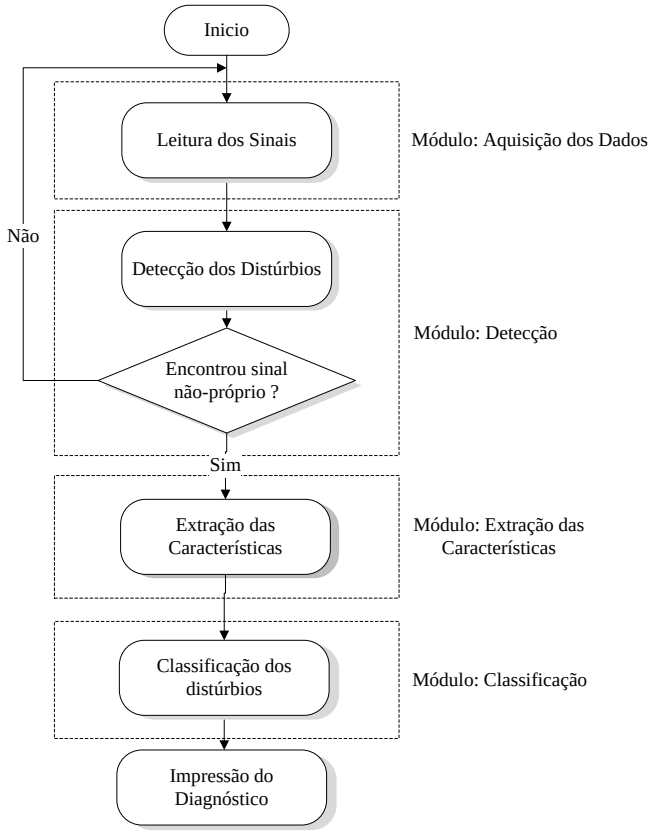
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Como dito anteriormente o critério de casamento utilizado para verificar o casamento entre os sinais é o casamento parcial. Este critério tem um desvio para mais ou para menos, sendo conhecido por desvio ε (BRADLEY; TYRRELL, 2002).

6.1.3 Fase de monitoramento

A fase de monitoramento é subdividida em quatro módulos, os quais são responsáveis por fazer a aquisição dos dados, realizar a detecção próprio/não-próprio, realizar a extração das características e a classificação dos distúrbios. Na figura 14 apresenta-se um diagrama simplificado do funcionamento da fase de monitoramento dos dados.

Figura 14 – Diagrama de módulos da fase de monitoramento.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

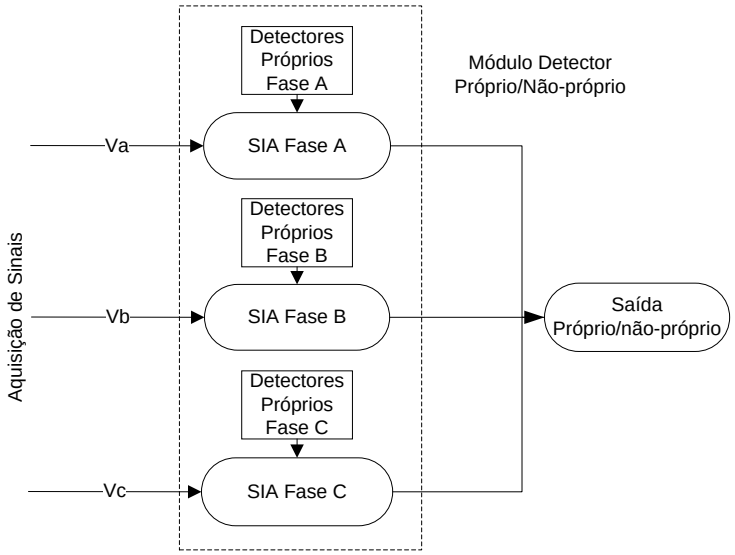
O módulo de aquisição de dados realiza a leitura das oscilografias de tensão medidas na subestação para as três fases (via sistema de aquisição de dados (Sistema SCADA)). A taxa de amostragem utilizada é de 15,36 kHz, a qual corresponde a 256 amostras por ciclo.

Após realizar a aquisição do sinal é executado o módulo de detecção próprio/não-próprio, onde utiliza-se, como detectores próprios, o conjunto de detectores próprios gerados e utilizados na fase de censoriamento. Neste conjunto de detectores estão armazenados vetores próprios de 256 pontos, que representam uma janela do sinal amostrado em operação normal do sistema.

Neste módulo após ler um sinal, executa-se um janelamento de 1 ciclo (256 pontos) no sinal, analisando janela por janela, e comparam-se estas janelas com o conjunto de detectores próprios, visando identificar um casamento entre os sinais, respeitando a taxa de afinidade definida pelo usuário.

O diagnóstico gerado é uma classificação dos sinais analisados em próprios e não-próprios. Sendo os sinais próprios o estado normal de operação do sistema, e os sinais não-próprios a identificação de uma anomalia. A figura 15 ilustra o processo de detecção próprio/não-próprio.

Figura 15 – Módulo de detecção próprio/não-próprio.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para cada fase do sistema utiliza-se um sistema imunológico artificial com seus respectivos detectores. Durante o monitoramento dos sinais caso seja identificado algum sinal não-próprio, o sistema ira indicar na saída do módulo que uma anomalia foi encontrada, e apontar em qual fase do sistema elétrico ocorre o problema. Para isto utiliza-se uma codificação, onde o sinal não-próprio é associado a uma fase do sistema elétrico. A tabela 3 apresenta a codificação para a saída na fase de detecção.

Tabela 3 – Codificação da saída próprio/não-próprio.

Saída	Codificação
Fase *A*	10
Fase *B*	01
Fase *C*	11

Fonte: Elaboração do próprio autor.

A saída do módulo de detecção próprio/não-próprio aciona o módulo de extração das características, indicando em qual fase do sistema elétrico encontra-se a anomalia (não-próprio).

O módulo de extração da característica simplesmente armazena a janela em que foi identificado o sinal não-próprio, e separa esta janela do sinal original para poder classificá-la.

Na sequência o módulo de classificação é acionado e executado somente na fase que foi identificado o sinal não-próprio. O módulo de classificação é responsável por identificar a que tipo de distúrbio a anomalia se enquadra e classificá-la dentre os distúrbios de tensão conhecidos pelo sistema.

A execução do módulo é semelhante à detecção próprio/não-próprio, porém é executada somente na fase do sistema que indica a presença de uma anormalidade. Nesta fase realiza-se uma comparação da janela (256 pontos) do sinal anormal separado pelo módulo de extração de características com o conjunto de padrões detectores de distúrbios. Neste trabalho 7 tipos de distúrbios são contemplados, portanto tem-se 7 classes de padrões detectores geradas na fase de censoriamento, em que cada uma destas classes armazena diversos detectores com 256 pontos de comprimento. A quantidade de detectores gerada é definida pelo operador.

Na sequência desta fase compara-se a janela com os conjuntos de detectores, analisando um por um, e verificando o casamento entre os sinais, caso seja encontrado um casamento com um conjunto de detectores, o módulo de classificação apresenta na saída, o diagnóstico para a janela anormal, classificando o sinal em um dos 7 tipos de distúrbios. O módulo de classificação retorna uma saída codificada para os 7 tipos de distúrbios, isto é, uma codificação para representar com qual matriz de detectores o sinal se casou. A tabela 4 apresenta a codificação para o diagnóstico encontrado pelo sistema.

Tabela 4 – Codificação da saída do módulo de classificação.

Distúrbios	Saída
Outage	000
Harmônico	001
Sag	010
Swell	011
Sag-Harmônico	100
Swell-Harmônico	110
Transitório Oscilatório	111

Fonte: Elaboração do próprio autor.

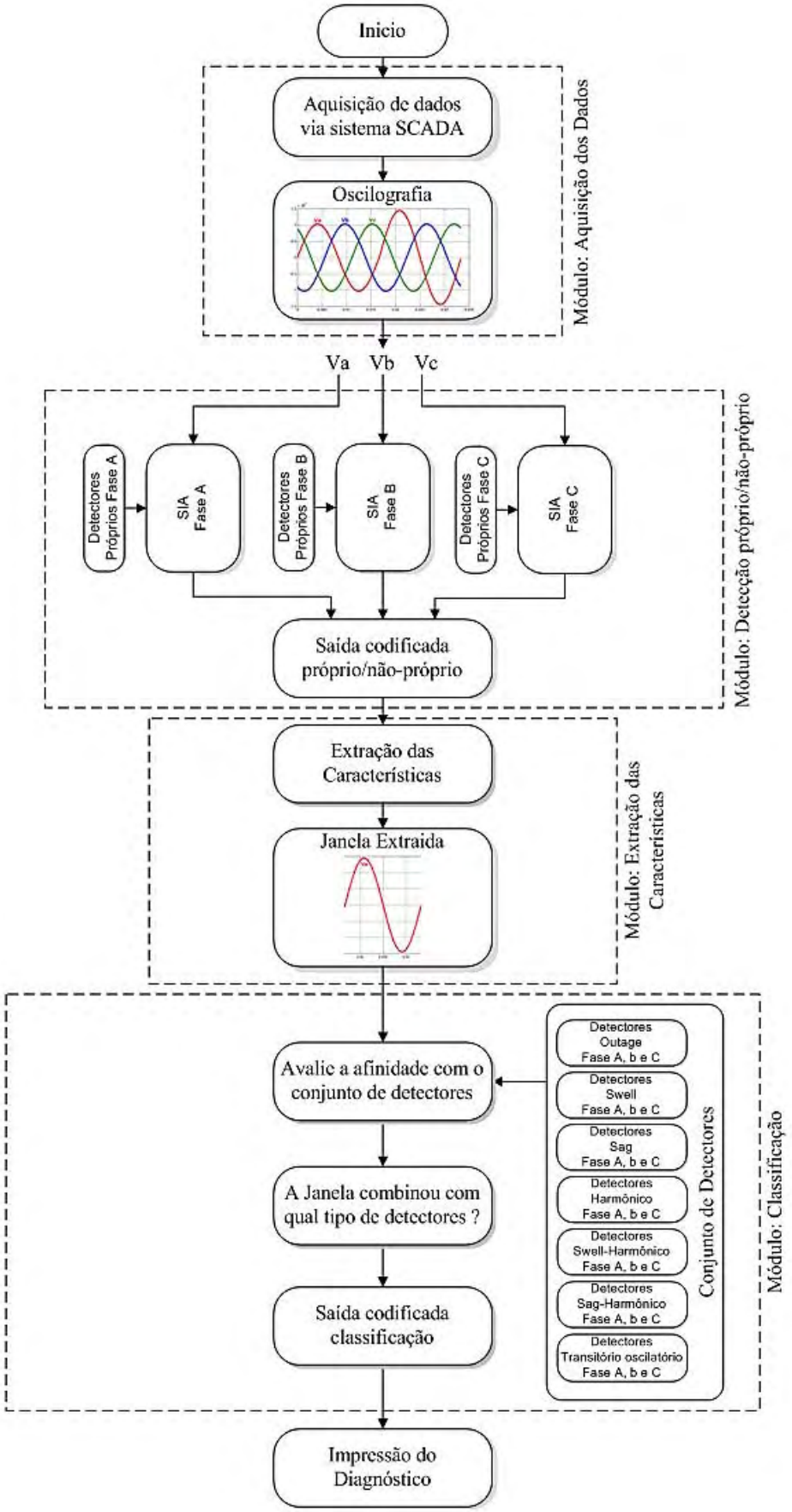
A fase de monitoramento pode ser descrita nos passos a seguir:

- 1º Passo: Defina o valor da taxa de afinidade e do desvio ε;
- 2º Passo: Realizar a leitura dos sinais a serem monitorados;
- 3º Passo: Analisar individualmente cada fase do sistema elétrico;
- 4º Passo: Para cada fase do sistema elétrico (*Va*, *Vb* e *Vc*), verifique a afinidade e o casamento entre o sinal e o conjunto de detectores próprios. Caso seja encontrado um casamento, descarte o sinal, pois o mesmo representa a operação normal do sistema. Caso contrário, indique na saída do módulo a codificação que associe a anormalidade com a fase do sistema elétrico em que foi detectada;
- 5º Passo: Extraia a janela em que foi identificada a anormalidade, separando a mesma para o módulo de classificação;
- 6º Passo: Avalie o casamento e a afinidade da janela extraída quando comparada ao conjunto de detectores de distúrbios. Quando for encontrado um casamento entre a janela extraída e o conjunto de detectores, indique na saída do módulo de classificação o código que associa esta janela aos detectores de distúrbios.
- 7º Passo: Apresente o diagnóstico.

Estes passos são repetidos para cada sinal a ser analisado pelo sistema de diagnóstico de distúrbios de tensão.

Os passos apresentados anteriormente são ilustrados no fluxograma apresentado na figura 16.

Figura 16 – Fluxograma da fase de monitoramento.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

6.2 Exemplo didático

Para melhor compreensão da metodologia, apresenta-se neste tópico um exemplo didático do funcionamento da análise realizada pelo sistema de diagnóstico de distúrbios de tensão para identificar e classificar os distúrbios.

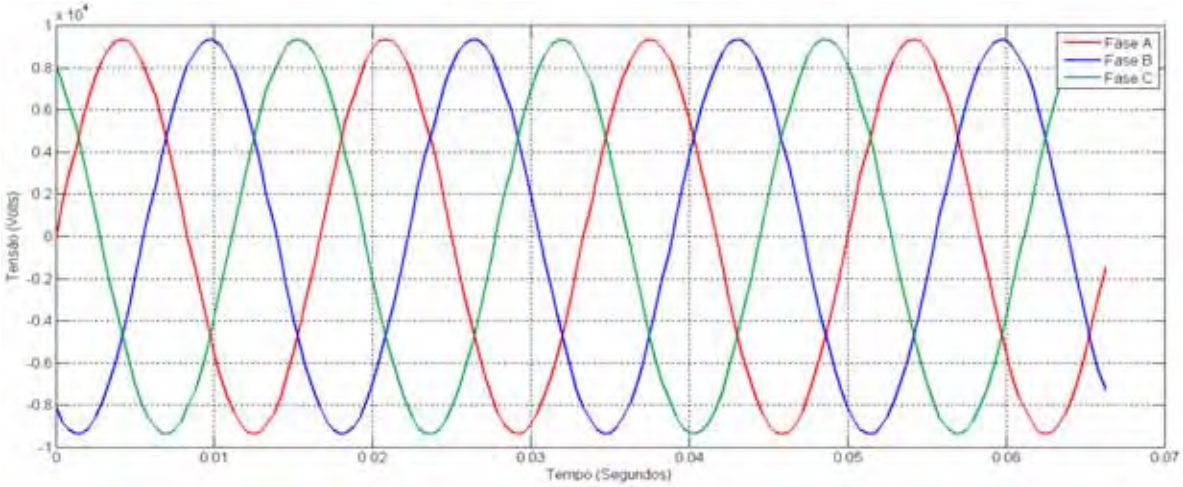
Então, de maneira simplificada, apresenta-se a geração do detector e o monitoramento de um sinal sobre efeito de um distúrbio. Vale ressaltar que o procedimento apresentado é realizado apenas para uma fase do sistema elétrico. No entanto, durante o funcionamento do sistema este procedimento é realizado nas demais fases.

Para este exemplo foram realizadas simulações no sistema de 5 barras, com uma frequência de amostragem de 2,4 kHz, a qual corresponde a 40 amostras por ciclo e o tempo de simulação foi de 66,8 ms (tempo correspondente a aproximadamente 4 ciclos).

Com estas configurações foram gerados três sinais, sendo um sinal contendo a operação normal do sistema (próprio), e os outros dois sinais sobre o efeito de um distúrbio harmônico (não-próprio), destes dois sinais um é para gerar o padrão detector harmônico e o outro para ser analisado (monitorado) pelo sistema.

Inicialmente, definem-se os parâmetros utilizados, sendo a taxa de afinidade de 66,6%, e um desvio ε igual a 3%. A partir da operação normal do sistema geram-se os padrões detectores próprios. A figura 17 ilustra o sistema em operação normal.

Figura 17 – Oscilografia do sistema em operação normal.

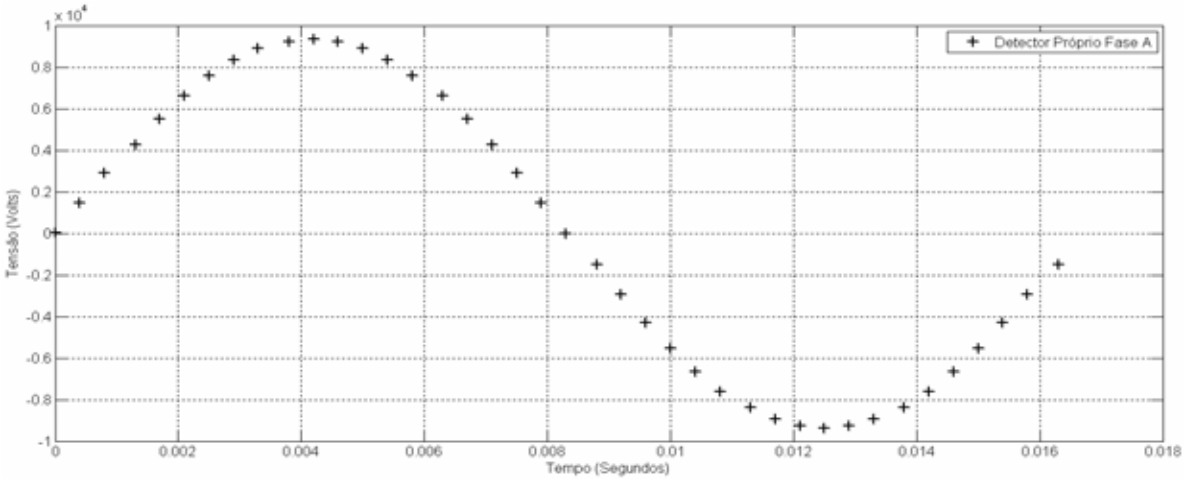


Fonte: Elaboração do próprio autor.

Para geração dos detectores próprios realiza-se um janelamento de 1 ciclo (40 pontos) na oscilografia contendo a operação normal (figura 17). O detector próprio deve

conter as características de um ciclo, isto é, uma janela (40 pontos), para ser utilizado em comparações no processo de censoriamento e monitoramento do sistema. Então, o mesmo é armazenado no conjunto de detectores próprios. A figura 18 a seguir ilustra um detector próprio para fase A, extraído da oscilografia apresentada na figura 17.

Figura 18 – Detector próprio fase A.

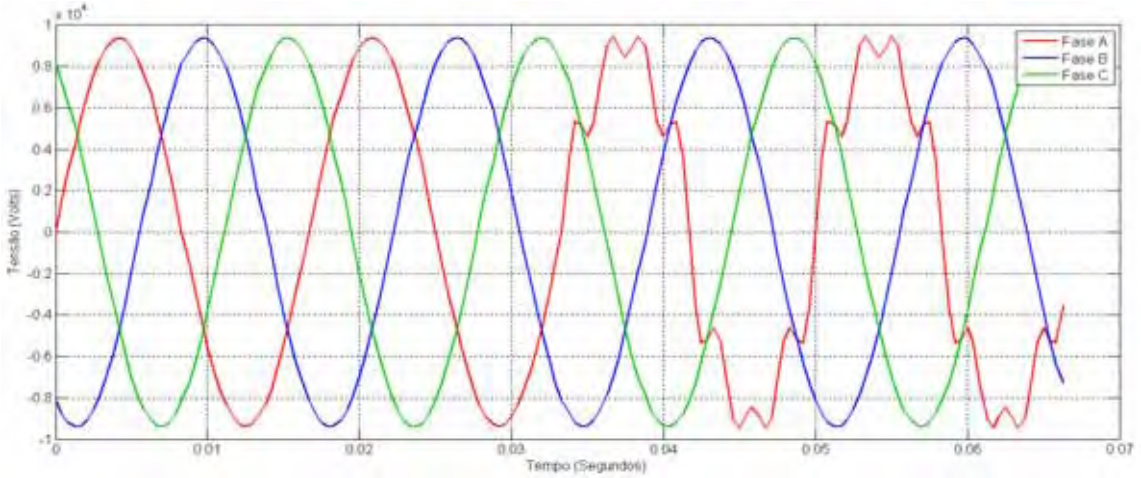


Fonte. Elaboração do próprio autor.

Após gerar o padrão detector próprio, executam-se os passos da fase de censoriamento, no qual é utilizado um sinal com o efeito do distúrbio harmônico para gerar de um detector harmônico para ser utilizado na fase de monitoramento de dados.

Na figura 19 apresenta-se a oscilografia do sinal com o efeito do distúrbio harmônico que será utilizada para gerar o detector.

Figura 19 – Oscilografia do sistema sobre efeito do distúrbio harmônico.

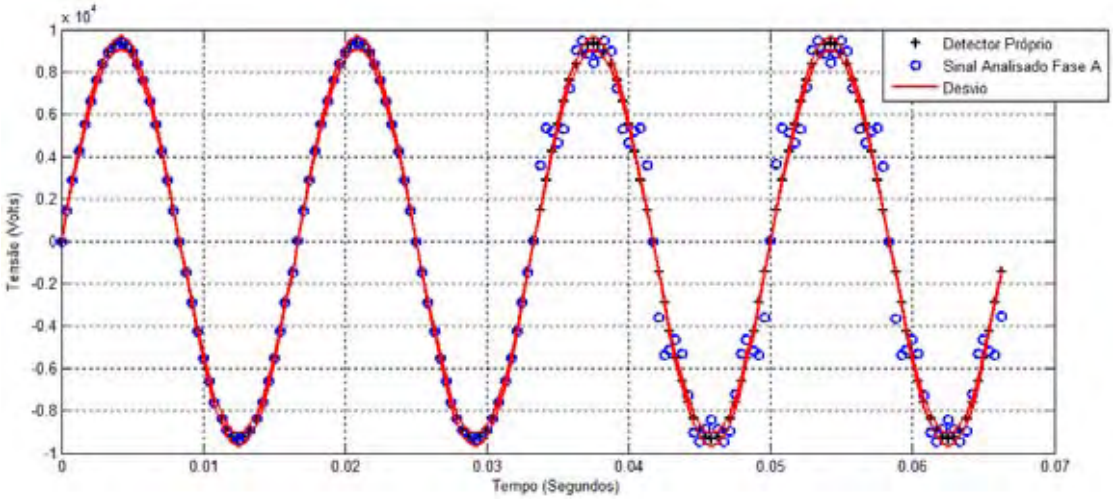


Fonte: Elaboração do próprio autor.

No sinal apresentando na figura 19 é possível observar que no sistema só ocorre o efeito do distúrbio a partir do terceiro ciclo, isto é, no processo de geração dos detectores harmônicos, somente o terceiro ciclo ira apresentar um sinal não-próprio, que se difere do detector próprio apresentado na figura 18.

Na sequência da execução do módulo de censoriamento, realiza-se um janelamento de 1 ciclo no sinal apresentado na figura (19) e compraram-se as janelas com o detector próprio (figura 18). Este procedimento é ilustrado na figura 20.

Figura 20 – Análise do sinal harmônico para gerar o detector.



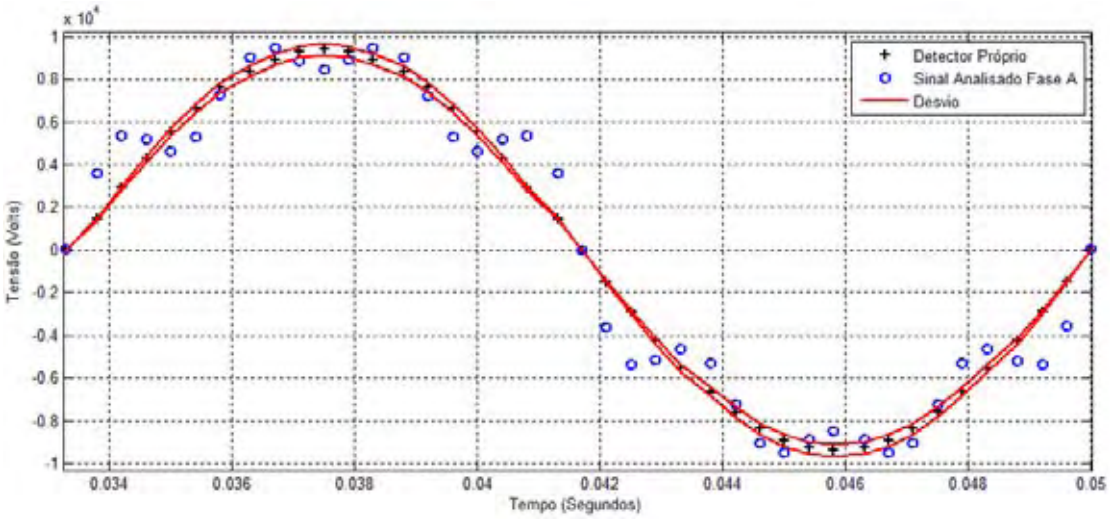
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Na figura 21 ilustra-se o terceiro ciclo, onde ocorre a presença de anormalidade. Neste ciclo é possível visualizar a quantidade de pontos casados entre os sinais. A quantidade de pontos casados possibilita calcular a afinidade entre os dois sinais. A quantidade de pontos casados é apresentada na equação (9). Na equação (10) encontra-se o cálculo da afinidade entre os dois sinais, conforme especificado na equação (7).

$$\sum_{i=1}^{L} Pc = 6 \tag{9}$$

$$Af_T = \frac{6}{40} * 100 = 15\% \tag{10}$$

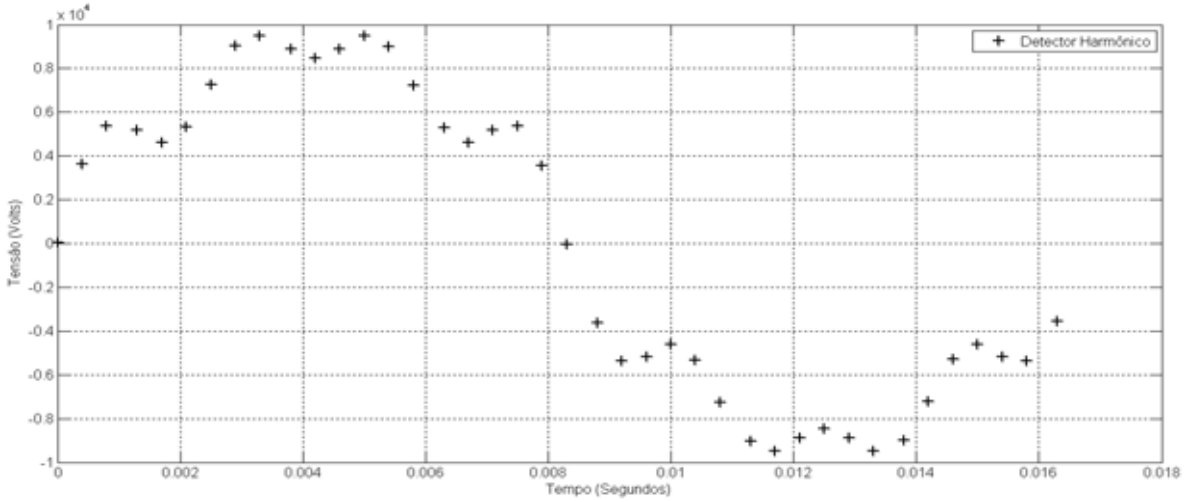
Figura 21 – Terceiro ciclo da análise do sinal harmônico.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A afinidade entre as janelas é de 15%. Isto significa que foi encontrado um sinal não-próprio, e que o mesmo será armazenado como detector. Então, a janela do terceiro ciclo é extraída como detector do distúrbio harmônico. A figura 22 ilustra o detector salvo a partir desta janela.

Figura 22 – Detector harmônico fase A.



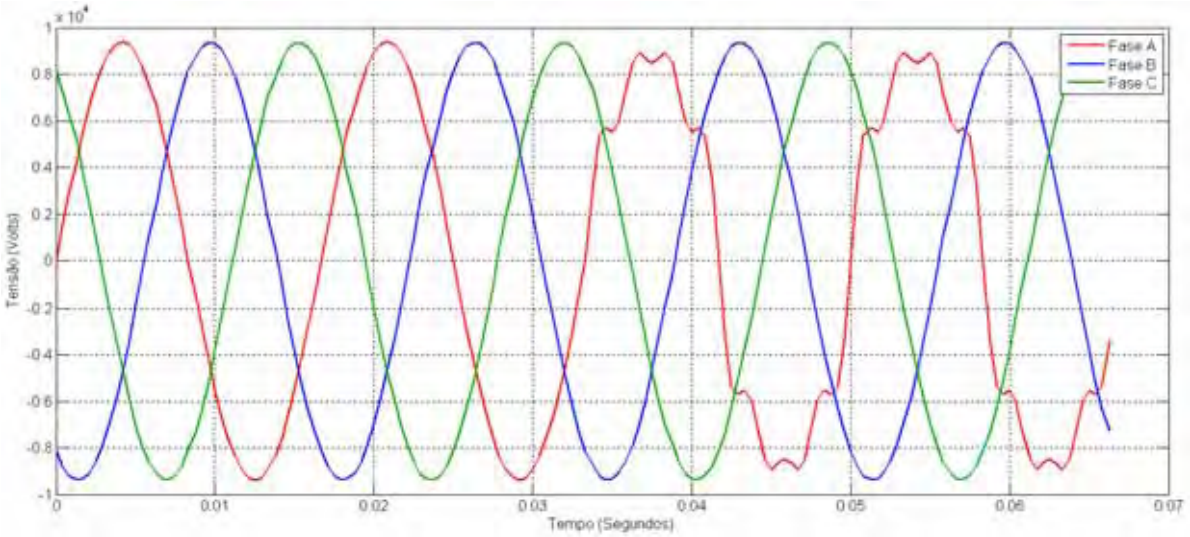
Fonte: Elaboração do próprio autor.

Este é o fim da fase de censoriamento, onde foi gerado um detector próprio e um detector do distúrbio harmônico. Na sequência será realizada a fase de monitoramento.

Após criar o detector próprio e o detector harmônico executa-se o monitoramento de dados, onde será feita uma análise na oscilografia apresentada na figura 23 que contém um

sinal sobre o efeito de um distúrbio harmônico. Vale ressaltar que este sinal é diferente do sinal apresentado na figura 19.

Figura 23 – Oscilografia a ser monitorada pelo sistema.

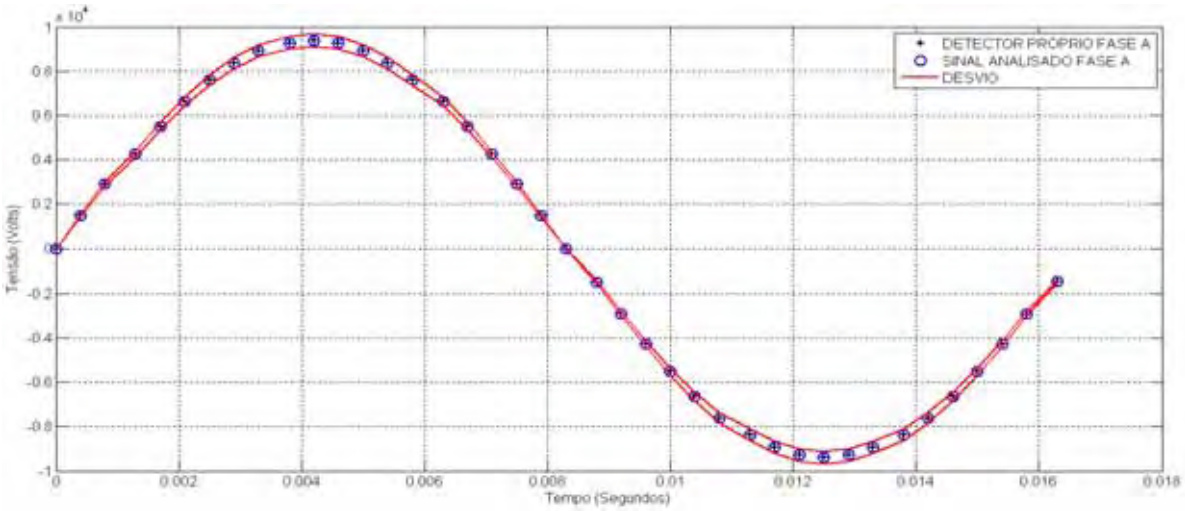


Fonte: Elaboração do próprio autor.

No processo de monitoramento executa-se um janelamento de 1 ciclo (40 pontos) neste sinal, e realiza-se uma análise ciclo a ciclo (janela a janela), verificando se o sinal é próprio/não-próprio, caso encontre um sinal não-próprio o módulo de extração de características é acionado e, posteriormente, este sinal não-próprio é classificado.

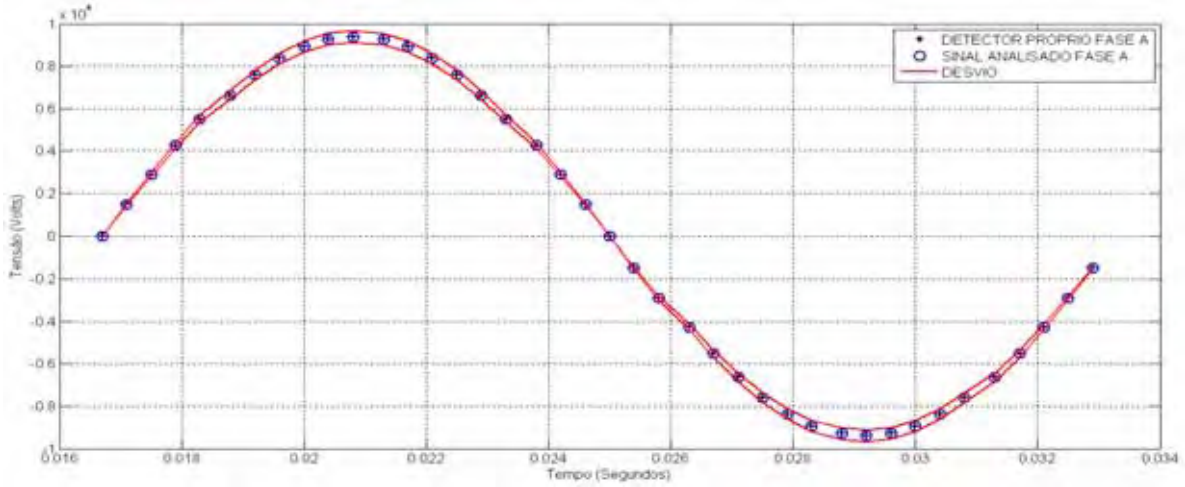
As figuras 24 e 25 ilustram as janelas do primeiro e segundo ciclo do sinal apresentando na Figura 23 sendo comparado com o detector próprio (figura 18).

Figura 24 – Ciclo 1 do sinal analisado.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Figura 25 – Ciclo 2 do sinal analisado.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A quantidade de pontos casados no primeiro e segundo ciclo analisado é apresentada na equação (11). Na equação (12) encontra-se o cálculo da afinidade entre o sinal em análise e o detector próprio.

$$\sum_{i=1}^{L} Pc = 40 \tag{11}$$

$$Af_T = \frac{40}{40} * 100 = 100\% \tag{12}$$

Como apresentado na equação (12), os dois primeiros ciclos analisados tem uma afinidade (semelhança) equivalente a 100%, quando comparados com o padrão detector próprio. Portanto a afinidade entre as janelas é maior que a taxa de afinidade (TAf = 66,6%), então os dois ciclos são considerados, sinais próprios.

Na figura 26 apresenta-se o terceiro ciclo do sinal analisado.

A quantidade de pontos casados no terceiro ciclo analisado é apresentada na equação (13). Na equação (14) encontra-se o cálculo da afinidade entre o sinal em análise e o detector próprio.

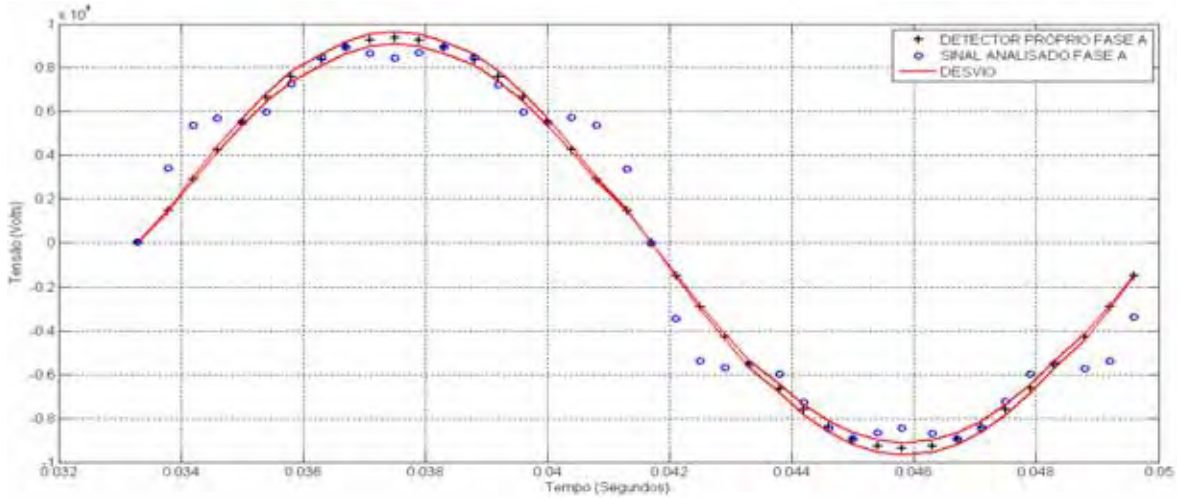
$$\sum_{i=1}^{L} Pc = 16 \tag{13}$$

$$Af_T = \frac{16}{40} * 100 = 40\% \tag{14}$$

A afinidade entre o padrão detector e o terceiro ciclo do sinal analisado é de 40%, muito abaixo da taxa de afinidade (TAf = 66,6%), isto significa que um sinal não-próprio foi detectado.

Observe que os pontos do sinal analisado estão até mesmo fora do limite do desvio ε de 3%. Sendo assim, neste momento, executa-se o módulo de extração de característica, que tem a função de armazenar a janela atual para que a mesma possa ser comparada com os detectores de distúrbios e ser classificada.

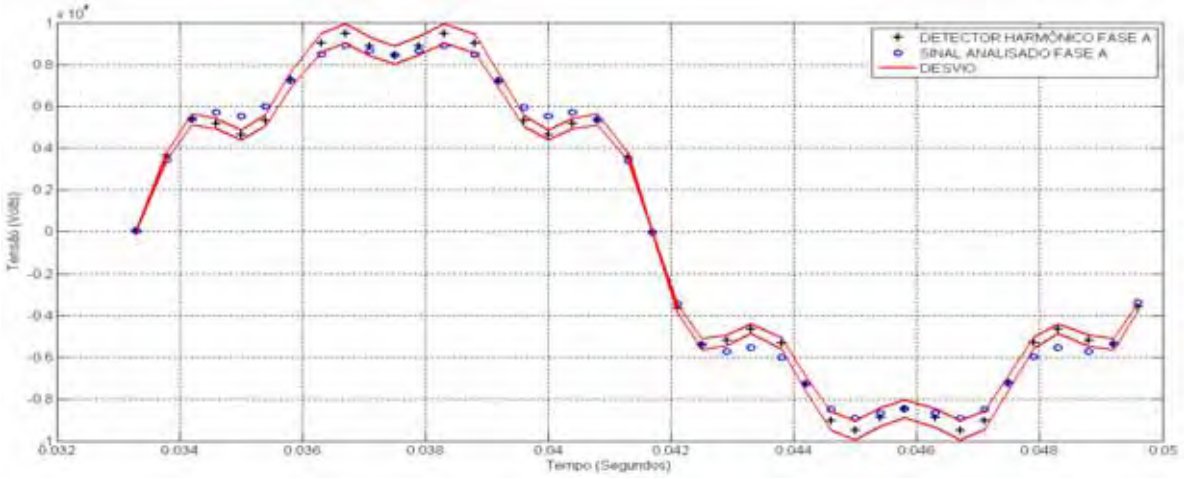
Figura 26 – Ciclo 3 do sinal analisado.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Após extrair a janela detectada na figura 26, executa-se o módulo de classificação. Este processo esta ilustrado na figura 27, onde se compara a janela extraída da figura 26 com o detector de distúrbio harmônico (figura 22).

Figura 27 – Análise realizada pelo módulo de classificação.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

A quantidade de pontos casados entre a janela extraída e o padrão detector de distúrbio harmônico é apresentada na equação (15). Na equação (16) encontra-se o cálculo da afinidade entre a janela extraída e o detector harmônico:

$$\sum_{i=1}^{L} Pc = 28 \tag{15}$$

$$Af_T = \frac{28}{40} * 100 = 70\% \tag{16}$$

A afinidade entre o padrão detector de distúrbio harmônico e a janela extraída do sinal analisado é de 70%. Este valor de afinidade é maior que a taxa de afinidade (*TAf* = 66,6%), portanto ocorre um casamento entre o detector harmônico e a janela extraída. Isto significa que o sinal que esta sendo analisado apresenta uma perturbação do tipo harmônico.

No processo de classificação o detector harmônico casou com o sinal analisado, sendo que 28 pontos detectores foram acionados, ou seja, 70% dos pontos se casaram com o detector ou estavam entre os limites do desvio ε. Como as janelas se casaram, o sinal que esta sendo analisado é diagnosticado como um distúrbio harmônico.

Este processo, descrito como um exemplo didático, expressa como é realizado o diagnóstico pelo sistema. Ressalta-se que foi feito o exemplo apenas para uma fase do sistema elétrico (fase A), sendo que durante o funcionamento normal do sistema de diagnóstico, as três fases são analisadas da mesma forma em que foi exposto neste exemplo.

6.3 Comentários

Neste capítulo foi apresentada a metodologia proposta, ou seja, o sistema de diagnóstico de distúrbios de tensão com seus passos e fluxogramas. Também foi apresentado um exemplo didático para compreender melhor o funcionamento da metodologia.

7 TESTES E RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os testes e resultados obtidos, através da aplicação da metodologia proposta nas simulações apresentadas no capítulo 4. Todas as simulações foram realizadas utilizando um PC Intel Core 2 Duo 1.9 GHz, 2 GB de Memória RAM, e sistema operacional Windows 7 Ultimate, 32 bits.

Para evidenciar e validar o desempenho do algoritmo proposto, o mesmo foi avaliado com os sistemas de distribuição de energia elétrica de 5, 33, 84, e 134 barras. Durante esta fase, os dados simulados foram selecionados de forma aleatória para tornar o processo mais real. Os dados de barras e circuitos dos sistemas de 5, 33, 84, e 134 foram retirados (BARAN; WU, 1989; CHIOU et al., 2005; LAPSSE, 2011) respectivamente. Todos os dados dos sistemas modelados neste trabalho são apresentados no Anexo D.

A metodologia proposta neste trabalho foi desenvolvida em MATLAB (MATLAB, 2011).

A seguir encontram-se descritos os testes e resultados obtidos para os sistemas testes simulados.

7.1 Conjunto de testes

Para avaliar o desempenho do método proposto foram utilizados quatro sistemas elétricos, sendo três sistemas testes (5, 33 e 84 barras) e um sistema real (134 barras).

Estes sistemas foram modelados no software ATP/EMTP (EMTP-RV, 2011), e foram realizadas simulações dos distúrbios nos alimentadores de distribuição. No total foram realizadas 2528 simulações, sendo 2496 simulações para serem utilizadas como conjunto de testes, assim como conjunto de dados para geração de detectores e as 32 simulações restantes para o conjunto de detectores próprios, pois foram realizadas sem perturbações.

Como o conjunto de dados pode ser utilizado tanto no censoriamento como no monitoramento do sistema, respeita-se um critério proposto por FORREST et al., (1994), que diz que ao utilizar o conjunto de dados para gerar detectores, utilizar no máximo 30% dos dados, pois no sistema biológico a quantidade de detectores distribuídos pelo organismo representa 30% de todas os agentes infecciosos presentes no corpo. Então para tornar o

processo mais dinâmico e real, neste trabalho utiliza-se no máximo 30% dos dados como detectores na fase de censoriamento.

Sendo assim na tabela 5 apresentam-se o conjunto de testes disponíveis para cada sistema elétrico e a quantidade máxima de detectores que pode ser gerada para cada tipo de distúrbio.

Tabela 5 – Quantidade máxima de detectores.

Distúrbios	Conjunto de testes	Quantidade máxima de detectores
Outage	48	15
Harmônico	144	42
Sag	72	21
Swell	72	21
Sag-Harmônico	96	27
Swell-Harmônico	96	27
Transitório Oscilatório	96	27
Total	624	180

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Vale ressaltar que a quantidade máxima de detectores que pode ser gerada esta associada a todas as fases do sistema elétrico. Portanto, se ao considerar a quantidade de detectores por fase deve-se dividir o valor apresentado na tabela 5 por 3. Os valores máximos de detectores foram aproximados a um valor múltiplo de 3, que represente 30% das informações disponíveis.

Os detectores próprios para cada sistema são fixos, sendo utilizados 8 detectores para cada sistema elétrico, cada um representando a operação normal do sistema em cada carregamento. Então o conjunto de detectores próprios possui um valor fixo de 8 detectores para cada sistema elétrico.

7.2 Parâmetros

Alguns parâmetros são fundamentais para o bom desempenho do método proposto neste trabalho, sendo a taxa de afinidade (*TAf*), o desvio ε e o número de detectores gerados na fase de censoriamento do sistema.

Usando o conceito proposto por Bradley e Tyrrell (2002) calcula-se a taxa de afinidade através de uma definição estatística, como apresentado em (8). Portanto a taxa de afinidade (*TAf* = 66,6%). Este valor pode ser arbitrado. Porém o cálculo estatístico proporciona mais precisão.

O desvio é adotado pelo usuário do sistema de diagnóstico, sendo concebido em um valor de até 10% do valor nominal (BRADLEY; TYRRELL, 2002).

A quantidade de detectores gerados na fase de censoriamento é definida pelo usuário do sistema de diagnóstico, desde que não ultrapasse o número máximo de detectores que podem ser gerados para cada tipo de distúrbio (apresentado na tabela 5).

Então, os parâmetros podem influenciar diretamente o resultado obtido pelo sistema de diagnóstico quando aplicado na análise das simulações realizadas.

7.3 Descrição dos testes

Visando garantir um bom desempenho para o sistema de diagnóstico de distúrbios de tensão, o mesmo foi submetido a diversos testes. Nestes testes foram realizadas variações nos valores de parâmetros como a taxa de afinidade (*TAf*), o desvio ε e o número de detectores gerados na fase de censoriamento do sistema.

Como os sistemas imunológicos artificiais possuem o conceito de aleatoriedade, não se pode garantir a precisão dos resultados quando o método é executado uma única vez. Portanto, neste sentido, todos os testes foram executados 20 vezes. O resultado apresentado é a média aritmética dos resultados obtidos na execução de todos os programas (teste de referência cruzada). Nos resultados também é apresentado o desvio padrão, isto é, a margem de erro que foi obtida no teste de referência cruzada. O desvio padrão é calculado utilizando a expressão apresentada em (17):

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2} \qquad (17)$$

em que:

S : desvio padrão;

$\bar{x}$: média de acerto em todos os testes;

n : número de testes.

A seguir encontram-se descritas as configurações dos testes e seus resultados.

7.3.1 Teste I

Neste teste o objetivo é realizar uma análise com o desvio mantendo a maior originalidade possível nos valores dos parâmetros. Então o valor da taxa de afinidade foi calculado em (8), isto é, *TAf* = 66,6%, o valor do desvio ε para este teste será de 3 e 5% (valores arbitrários, porém considerados normais). O conjunto de detectores próprios é formado por 8 detectores, no qual, cada detector representa a operação normal do sistema elétrico em cada carregamento simulado.

Para este teste, na fase de censoriamento, foram considerados até 30% dos dados como detectores. Porém, não foi levada em conta a proporcionalidade para cada distúrbio, e sim o total de simulações. Assim, foi adotado um número de detectores iguais para cada distúrbio na fase de censoriamento.

Foram gerados 5 detectores para cada fase do sistema elétrico, em cada tipo de distúrbio, isto é, 15 detectores para cada tipo de distúrbio, totalizando um conjunto de detectores com 105 detectores de distúrbios. Vale ressaltar que o conjunto de detectores para este teste foi gerado 20 vezes, ou seja, um conjunto de detectores diferente para cada vez que o método foi executado no teste de referência cruzada.

O método proposto foi aplicado ao conjunto de testes, com as configurações mencionadas anteriormente e obtiveram-se os resultados apresentados nas tabelas 6 e 7. Na tabela 6 apresentam-se os resultados considerando o desvio ε = 3%, e na tabela 7 apresentam-se os resultados considerando o desvio ε = 5%. Os resultados representam a média de acerto obtida no teste de referência cruzada em conjunto com o desvio padrão.

Tabela 6 – Resultados do teste I, considerando ε = 3%.

		Sistema de 5 Barras		Sistema de 33 Barras		Sistema de 84 Barras		Sistema de 134 Barras	
Diagnóstico	Padrões testados	Acerto (%)	Desvio padrão	Acerto (%)	Desvio padrão	Acerto (%)	Desvio padrão	Acerto (%)	Desvio padrão
Swell	72	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00
Sag	72	97,50	±1,40	98,47	±0,89	95,94	±0,82	95,00	±1,31
Outage	48	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00
Harmônico	144	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00
Swell - Harmônico	96	100,00	±0,00	100,00	±0,00	96,82	±1,53	100,00	±0,00
Sag- Harmônico	96	97,91	±0,82	98,13	±0,72	100,00	±0,00	97,34	±1,45
Transitório Oscilatório	96	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00
Total	624	99,34	±0,31	99,51	±0,23	98,96	±0,33	98,90	±0,39

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 7 – Resultados do teste I, considerando ε = 5%.

		Sistema de 5 Barras		Sistema de 33 Barras		Sistema de 84 Barras		Sistema de 134 Barras	
Diagnóstico	Padrões testados	Acerto (%)	Desvio padrão	Acerto (%)	Desvio padrão	Acerto (%)	Desvio padrão	Acerto (%)	Desvio padrão
Swell	72	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00
Sag	72	97,36	±1,09	95,56	±1,32	97,15	±1,05	93,13	±1,15
Outage	48	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00
Harmônico	144	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00
Swell - Harmônico	96	100,00	±0,00	100,00	±0,00	95,78	±0,79	100,00	±0,00
Sag- Harmônico	96	98,07	±1,03	96,98	±0,75	100,00	±0,00	91,54	±0,75
Transitório Oscilatório	96	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00
Total	624	99,34	±0,30	98,93	±0,29	98,99	±0,26	97,81	±0,27

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os resultados obtidos neste teste são considerados satisfatórios, pois quando comparados com resultados encontrados na literatura, apresentam um bom índice de acerto.

O acerto médio do sistema de diagnóstico utilizando um desvio ε = 3% é de 99,17% com um desvio padrão de ±0,31, já utilizando um desvio ε = 5% o acerto médio é de 98,76% com um desvio padrão de ±0,28. Fica evidente que o desvio influencia diretamente no resultado. Neste teste, ao aumentar o desvio ε de 3% para 5%, considerando todos os outros parâmetros iguais, observa-se um aumento significativo de erros no diagnóstico.

Vale ressaltar que os erros aumentaram devido ao aumento da região do desvio, assim é possível detectar sinais erroneamente, pois se os limites de detecção aumentam a possibilidade de que mais pontos se casem é maior, o que pode tornar o sistema impreciso. Também deve ser ressaltada a quantidade de detectores utilizados (aproximadamente 17% dos dados).

Os resultados utilizados no teste de referência cruzada do teste I estão ao final do trabalho no anexo E. Neste anexo, são apresentados os resultados para as 20 execuções do programa em cada sistema elétrico e para cada parâmetro de desvio ε.

O tempo de execução do sistema de diagnóstico para o teste I é apresentado na tabela 8. Vale ressaltar que todos os resultados foram obtidos com um tempo computacional inferior a 100 milésimos de segundos.

Tabela 8 – Tempo de processamento para o teste I.

	Desvio ε = 3%			
Sistema	5 Barras	33 Barras	84 Barras	134 Barras
Tempo (*ms*)	83,2	85,5	89,2	87,3
	Desvio ε = 5%			
Sistema	5 Barras	33 Barras	84 Barras	134 Barras
Tempo (*ms*)	89,8	87,5	93,8	91,2

Fonte: Elaboração do próprio autor.

7.3.2 Teste II

Neste teste o objetivo é realizar uma análise com a quantidade de detectores gerados na fase de censoriamento do sistema.

O valor da taxa de afinidade utilizada para este teste foi calculado em (8), isto é, *TAf* = 66,6%, o valor do desvio ε para este teste será de 3% (valor arbitrário, porém proporciona bons resultados, como apresentado no teste I).

Visando cumprir o critério proposto por Forrest et al., (1994), onde o conjunto de detectores deve utilizar até 30% dos dados, para este teste, na fase de censoriamento, foram gerados 5 conjuntos de padrões detectores para cada sistema elétrico, com as configurações que são apresentados na tabela 9.

Tabela 9 – Conjunto de detectores teste II.

Distúrbios	Conjunto de detectores A	Conjunto de detectores B	Conjunto de detectores C	Conjunto de detectores D	Conjunto de detectores E
% dos dados	10%	15%	20%	25%	30%
Outage	3	6	9	12	15
Harmônico	15	21	27	36	42
Sag	6	9	15	18	21
Swell	6	9	15	18	21
Sag-Harmônico	9	15	18	24	27
Swell-Harmônico	9	15	18	24	27
Transitório Oscilatório	9	15	18	24	27
Total	57	90	120	156	180

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os conjuntos de detectores gerados variam de 10% a 30% das informações disponíveis. Lembrando que a quantidade de detectores para cada distúrbio representa o total

de simulações, para individualizar a quantidade de detectores por fase deve-se dividir o valor apresentado na tabela por 3.

Após aplicar o método proposto no conjunto de testes, com os 5 conjuntos de detectores criados a partir da tabela 9, obtiveram-se os resultados apresentados nas tabelas 10, 11, 12, 13 e 14 em que cada tabela apresenta os resultados para cada conjunto de detector.

Tabela 10 – Resultados do teste II, para o conjunto de detectores A.

		Sistema de 5 Barras		Sistema de 33 Barras		Sistema de 84 Barras		Sistema de 134 Barras	
Diagnóstico	Padrões testados	Acerto (%)	Desvio padrão	Acerto (%)	Desvio padrão	Acerto (%)	Desvio padrão	Acerto (%)	Desvio padrão
Swell	72	97,29	±0,95	94,95	±0,85	94,48	±0,68	93,28	±0,71
Sag	72	95,68	±0,70	94,22	±0,71	83,18	±0,78	94,38	±0,79
Outage	48	98,65	±1,69	99,06	±1,06	100,00	±0,00	99,48	±0,93
Harmônico	144	100,00	±0,00	99,58	±0,52	98,96	±0,53	100,00	±0,00
Swell - Harmônico	96	58,23	±0,75	72,97	±0,79	78,28	±0,70	66,77	±0,82
Sag- Harmônico	96	62,14	±0,97	66,51	±0,78	98,07	±1,03	74,58	±0,92
Transitório Oscilatório	96	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00
Total	624	87,42	±0,72	89,61	±0,67	93,28	±0,53	89,78	±0,60

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 11 – Resultados do teste II, para o conjunto de detectores B.

		Sistema de 5 Barras		Sistema de 33 Barras		Sistema de 84 Barras		Sistema de 134 Barras	
Diagnóstico	Padrões testados	Acerto (%)	Desvio padrão	Acerto (%)	Desvio padrão	Acerto (%)	Desvio padrão	Acerto (%)	Desvio padrão
Swell	72	95,93	±1,01	90,90	±0,71	95,14	±0,84	95,76	±0,95
Sag	72	93,19	±1,34	95,63	±0,93	92,71	±0,62	98,99	±1,07
Outage	48	100,00	±0,00	99,69	±0,76	100,00	±0,00	100,00	±0,00
Harmônico	144	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00
Swell - Harmônico	96	77,86	±0,67	82,81	±0,86	79,06	±0,95	76,09	±0,98
Sag- Harmônico	96	77,50	±0,52	75,36	±0,85	77,19	±0,95	78,49	±0,51
Transitório Oscilatório	96	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00
Total	624	92,07	±0,51	92,06	±0,59	92,01	±0,48	92,76	±0,50

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 12 – Resultados do teste II, para o conjunto de detectores C.

		Sistema de 5 Barras		Sistema de 33 Barras		Sistema de 84 Barras		Sistema de 134 Barras	
Diagnóstico	Padrões testados	Acerto (%)	Desvio padrão	Acerto (%)	Desvio padrão	Acerto (%)	Desvio padrão	Acerto (%)	Desvio padrão
Swell	72	97,15	±1,39	98,54	±0,95	96,11	±1,24	98,47	±0,89
Sag	72	95,97	±0,77	94,38	±0,84	98,75	±0,43	97,78	±0,83
Outage	48	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00
Harmônico	144	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00
Swell - Harmônico	96	84,64	±0,46	87,81	±0,49	83,44	±0,58	86,30	±0,61
Sag- Harmônico	96	85,78	±0,61	76,61	±0,70	84,69	±0,49	81,77	±0,63
Transitório Oscilatório	96	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00
Total	624	94,79	±0,46	93,91	±0,43	94,71	±0,39	94,90	±0,42

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 13 – Resultados do teste II, para o conjunto de detectores D.

		Sistema de 5 Barras		Sistema de 33 Barras		Sistema de 84 Barras		Sistema de 134 Barras	
Diagnóstico	Padrões testados	Acerto (%)	Desvio padrão	Acerto (%)	Desvio padrão	Acerto (%)	Desvio padrão	Acerto (%)	Desvio padrão
Swell	72	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00
Sag	72	97,78	±0,95	96,39	±0,70	97,78	±0,95	97,71	±1,03
Outage	48	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00
Harmônico	144	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00
Swell - Harmônico	96	100,00	±0,00	100,00	±0,00	91,72	±0,53	100,00	±0,00
Sag- Harmônico	96	92,08	±0,52	90,83	±0,43	100,00	±0,00	90,42	±0,43
Transitório Oscilatório	96	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00
Total	624	98,55	±0,21	98,17	±0,16	98,50	±0,21	98,30	±0,21

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 14 – Resultados do teste II, para o conjunto de detectores E.

		Sistema de 5 Barras		Sistema de 33 Barras		Sistema de 84 Barras		Sistema de 134 Barras	
Diagnóstico	Padrões testados	Acerto (%)	Desvio padrão	Acerto (%)	Desvio padrão	Acerto (%)	Desvio padrão	Acerto (%)	Desvio padrão
Swell	72	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00
Sag	72	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00
Outage	48	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00
Harmônico	144	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00
Swell - Harmônico	96	100,00	±0,00	100,00	±0,00	98,85	±0,58	100,00	±0,00
Sag- Harmônico	96	98,65	±0,76	97,08	±0,54	100,00	±0,00	98,02	±0,58
Transitório Oscilatório	96	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00
Total	624	99,81	±0,11	99,58	±0,08	99,84	±0,08	99,72	±0,08

Fonte: Elaboração do próprio autor.

O acerto médio do sistema de diagnóstico, para este teste, utilizando o conjunto de detectores A é de 90,02% com um desvio padrão de 0,63. Para o conjunto de detectores B é de 92,22% com um desvio padrão de 0,52. Para o conjunto de detectores C é de 94,57% com um desvio padrão de 0,42. Para o conjunto de detectores D é de 98,38% com um desvio padrão de 0,19. Considerando-se o conjunto de detectores E o índice de é de 99,73% com um desvio padrão de 0,08.

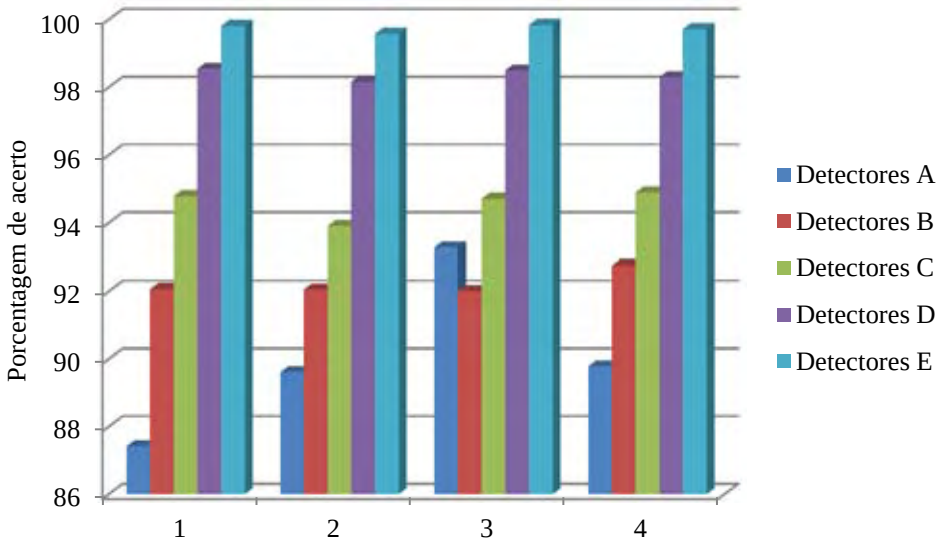
Os resultados utilizados no teste de referência cruzada do teste II estão ao final do trabalho no anexo E. Neste são apresentados os resultados para as 20 execuções do programa em cada sistema elétrico e para cada conjunto de detectores.

Com estes resultados fica claro que o conjunto de detectores é muito importante para o bom desempenho do sistema de diagnóstico, uma vez que o mesmo é gerado aleatoriamente e possui um número reduzido de informações.

Neste teste foi possível visualizar que ao aumentar a quantidade de detectores na fase de censoriamento do sistema, a quantidade de erros diminuiu. Portanto, deste teste destaca-se que quanto maior for o conjunto de detectores, mais dados e informações o sistema terá para detectar os distúrbios, e obter um bom desempenho, como foi comprovado nas tabelas anteriores.

Na figura 28 encontra-se um gráfico contendo o acerto total do sistema de diagnóstico para cada conjunto de detectores, para cada sistema elétrico.

Figura 28 – Gráfico de acertos para cada sistema.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

No gráfico é possível visualizar que conforme se aumenta a quantidade de detectores para cada sistema elétrico, a quantidade de acertos também aumenta. Neste gráfico também é possível visualizar que o sistema de diagnóstico de distúrbio de tensão tem um comportamento semelhante para todos os sistemas elétricos testados. As simulações foram geradas respeitando um padrão nos valores de parâmetros. Portanto o sistema de diagnóstico independentemente do tamanho do sistema elétrico, ou característica, mais ou menos indutiva, se adapta ao problema, apresentando robustez e sendo capaz de diagnosticar os distúrbios com precisão.

Outro fato a ser destacado é que a quantidade de detectores para cada classe distúrbio também influenciou individualmente no resultado, como apresentado nas tabelas o aumento da quantidade de detectores, proporcionou corrigir os erros no diagnóstico para diversas classes, e na tabela 14 encontra-se o melhor resultado até então, conseguindo superar erros em diversas classes de distúrbios.

O desvio $\varepsilon = 3\%$, proporciona uma boa precisão no intervalo a ser considerado o casamento, conforme foi apresentado nos resultados do teste I.

Os tempos de execução do sistema de diagnóstico para o teste II utilizando os conjuntos de detectores A, B, C, D e E são apresentados na tabela 15:

Tabela 15 – Tempo de processamento para o teste II.

	Conjunto de detectores A			
Sistema	5 Barras	33 Barras	84 Barras	134 Barras
Tempo (*ms*)	92,1	86,7	88,3	93,2
	Conjunto de detectores B			
Sistema	5 Barras	33 Barras	84 Barras	134 Barras
Tempo (*ms*)	88,6	94,5	94,6	87,3
	Conjunto de detectores C			
Sistema	5 Barras	33 Barras	84 Barras	134 Barras
Tempo (*ms*)	84,9	98,1	97,6	94,8
	Conjunto de detectores D			
Sistema	5 Barras	33 Barras	84 Barras	134 Barras
Tempo (*ms*)	91,5	94,7	89,2	92,5
	Conjunto de detectores E			
Sistema	5 Barras	33 Barras	84 Barras	134 Barras
Tempo (*ms*)	97,6	88,4	89,4	87,6

Fonte: Elaboração do próprio autor.

7.3.3 Teste III

Neste teste o objetivo é realizar uma análise com o parâmetro taxa de afinidade (*TAf*). Sabe-se que o valor pode ser calculado estatisticamente como proposto por (BRADLEY; TYRRELL, 2002), no entanto também pode ser arbitrado por um especialista.

Para este teste foi proposto uma variação na taxa de afinidade, onde foram arbitrados 3 valores, sendo as taxas de afinidade A = 30%, B = 66,6% (calculado em (8)) e C = 90%. Como parâmetros, utiliza-se o conjunto de detectores E, criado no teste II, e o desvio ε = 3%.

Após aplicar o método proposto no conjunto de testes, para os três valores da taxa de afinidade, obtiveram-se os resultados apresentados nas tabelas 16, 17, 18, no qual cada tabela apresenta os resultados para um valor da taxa de afinidade.

Tabela 16 – Resultados do teste III, para a taxa de afinidade A.

		Sistema de 5 Barras		Sistema de 33 Barras		Sistema de 84 Barras		Sistema de 134 Barras	
Diagnóstico	Padrões testados	Acerto (%)	Desvio padrão	Acerto (%)	Desvio padrão	Acerto (%)	Desvio padrão	Acerto (%)	Desvio padrão
Swell	72	34,86	±0,89	35,97	±0,77	28,13	±0,89	37,15	±0,89
Sag	72	37,85	±0,89	34,03	±0,71	33,68	±0,89	31,46	±0,68
Outage	48	55,73	±1,15	52,29	±0,64	44,27	±1,15	57,81	±0,93
Harmônico	144	32,15	±0,33	30,76	±0,33	31,28	±0,48	33,30	±0,48
Swell - Harmônico	96	37,81	±0,49	35,78	±0,51	35,42	±0,83	31,77	±0,53
Sag- Harmônico	96	34,22	±0,70	39,06	±0,53	32,71	±0,52	37,45	±0,71
Transitório Oscilatório	96	73,18	±0,46	69,17	±0,52	73,44	±0,79	72,03	±0,70
Total	624	43,69	±0,70	42,44	±0,57	39,85	±0,79	43,00	±0,70

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 17 – Resultados do teste III, para a taxa de afinidade B.

		Sistema de 5 Barras		Sistema de 33 Barras		Sistema de 84 Barras		Sistema de 134 Barras	
Diagnóstico	Padrões testados	Acerto (%)	Desvio padrão	Acerto (%)	Desvio padrão	Acerto (%)	Desvio padrão	Acerto (%)	Desvio padrão
Swell	72	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00
Sag	72	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00
Outage	48	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00
Harmônico	144	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00
Swell - Harmônico	96	100,00	±0,00	100,00	±0,00	98,85	±0,58	100,00	±0,00
Sag- Harmônico	96	98,65	±0,76	97,08	±0,54	100,00	±0,00	98,02	±0,58
Transitório Oscilatório	96	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00	100,00	±0,00
Total	624	99,81	±0,11	99,58	±0,08	99,84	±0,08	99,72	±0,08

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 18 – Resultados do teste III, para a taxa de afinidade C.

		Sistema de 5 Barras		Sistema de 33 Barras		Sistema de 84 Barras		Sistema de 134 Barras	
Diagnóstico	Padrões testados	Acerto (%)	Desvio padrão	Acerto (%)	Desvio padrão	Acerto (%)	Desvio padrão	Acerto (%)	Desvio padrão
Swell	72	97,71	±0,93	95,97	±0,89	95,42	±0,65	96,25	±0,65
Sag	72	94,72	±0,85	92,78	±0,97	94,93	±0,68	93,47	±0,65
Outage	48	99,17	±1,42	96,35	±0,93	96,35	±1,56	98,54	±0,98
Harmônico	144	99,27	±0,42	99,31	±0,45	98,78	±0,31	98,89	±0,35
Swell - Harmônico	96	75,27	±0,49	72,92	±0,68	97,66	±0,67	76,41	±0,51
Sag- Harmônico	96	73,28	±0,51	68,23	±0,53	73,28	±0,51	74,95	±0,71
Transitório Oscilatório	96	93,07	±0,51	95,00	±0,72	93,59	±0,70	93,02	±0,49
Total	624	90,36	±0,73	88,65	±0,74	92,86	±0,73	90,22	±0,62

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os tempos de execução do sistema de diagnóstico para o teste III utilizando as taxas de afinidade A, B e C são apresentados na tabela 19:

Tabela 19 – Tempo de processamento para o teste III.

	Taxa de afinidade A			
Sistema	5 Barras	33 Barras	84 Barras	134 Barras
Tempo (*ms*)	87,2	89,2	92,8	91,5
	Taxa de afinidade B			
Sistema	5 Barras	33 Barras	84 Barras	134 Barras
Tempo (*ms*)	92,3	93,5	92,7	88,7
	Taxa de afinidade C			
Sistema	5 Barras	33 Barras	84 Barras	134 Barras
Tempo (*ms*)	95,4	91,7	94,6	93,0

Fonte: Elaboração do próprio autor.

O acerto médio do sistema de diagnóstico para o teste III utilizando a taxa de afinidade A é de 42,24% com um desvio padrão de 0,69. Para a taxa de afinidade B é de 99,73% com um desvio padrão de 0,08, e para a taxa de afinidade C é de 90,52% com um desvio padrão de 0,70.

Os resultados utilizados no teste de referência cruzada do teste III estão ao final do trabalho no anexo E, neste são apresentados os resultados para as 20 execuções do programa

em cada sistema elétrico e para cada valor de taxa de afinidade.

Neste teste é possível visualizar que a medida que se varia a taxa de afinidade os resultados são alterados. Quando a taxa de afinidade é decrescida, o critério de casamento torna-se menos rigoroso, fazendo que sinais não-próprios sejam classificados como próprios. Já quando a taxa de afinidade é aumentada, observa-se que o desempenho piora, isto porque, o critério de casamento passa a ser muito rigoroso, sendo necessário praticamente um casamento perfeito entre os sinais para realizar o diagnóstico, o que é muito raro de acontecer. Assim alguns sinais não se casam com os detectores, não sendo classificados. Os sinais que não são classificados são entendidos como erro no sistema de diagnóstico.

Vale ressaltar que quando se arbitra um valor para a taxa de afinidade, assume-se o risco do desempenho do sistema não ser bom, já utilizando o cálculo estatístico proposto por (BRADLEY; TYRRELL, 2002), o sistema pode ser mais preciso. Portando através deste teste foi possível observar que a taxa de afinidade deve ser bem escolhida, pois seu valor influencia na precisão do diagnóstico.

7.4 Análise e discussões dos resultados

Após realizar todos os testes a maior média de acertos foi de 99,73% com um desvio padrão de 0,08, este resultado foi encontrado no teste II, utilizando uma taxa de afinidade (*TAf* = 66,6%), um desvio ε = 3% e o conjunto de detectores E (apresentado na tabela 9). Este resultado é uma média aritmética dos resultados obtidos na aplicação do conjunto de detectores E, a tabela 20 apresenta os resultados obtidos para os sistemas elétricos individualmente. Os valores dos parâmetros para esta configuração são os recomendáveis.

Tabela 20 – Melhor resultado encontrado.

	Sistema de 5 Barras	Sistema de 33 Barras	Sistema de 84 Barras	Sistema de 134 Barras
Acerto (%)	99,81±0,11	99,58±0,08	99,84±0,08	99,72±0,08

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Os resultados obtidos para os testes realizados neste trabalho são satisfatórios e comprovam que o algoritmo de seleção negativa é eficaz no processo de diagnóstico. Os parâmetros utilizados, bem como a quantidade de detectores influencia diretamente seu desempenho. Assim, torna-se necessário realizar uma fase experimental de testes para encontrar os parâmetros corretos. Vale ressaltar que neste trabalho utilizou-se até 30% dos dados como amostras para gerar os detectores de distúrbios. O valor do desvio ε = 3%

proporcionou uma boa precisão ao sistema, pois o intervalo para se considerar um casamento não é nem tão pequeno, nem tão grande.

Os detectores gerados na fase de censoriamento são essenciais para um bom diagnóstico, e nos testes realizados foi possível observar que quanto mais informações (quantidade de detectores) o sistema possui, melhor é o diagnóstico (acerto).

Deve-se ressaltar que o módulo de detecção próprio/não-próprio obteve 100% de acerto na detecção para a maioria dos resultados

Partindo destes fatos apresentados, fica evidente que o método é robusto e eficaz no processo de diagnóstico. O tempo de execução é bem reduzido (inferior a 100 milésimos de segundos), o que proporciona rapidez no diagnóstico.

Como foi observado nos resultados apresentados anteriormente, o sistema de diagnóstico de distúrbios de tensão obteve alguns erros (classificações erradas).

Analisando todo o contexto podem-se observar os seguintes aspectos:

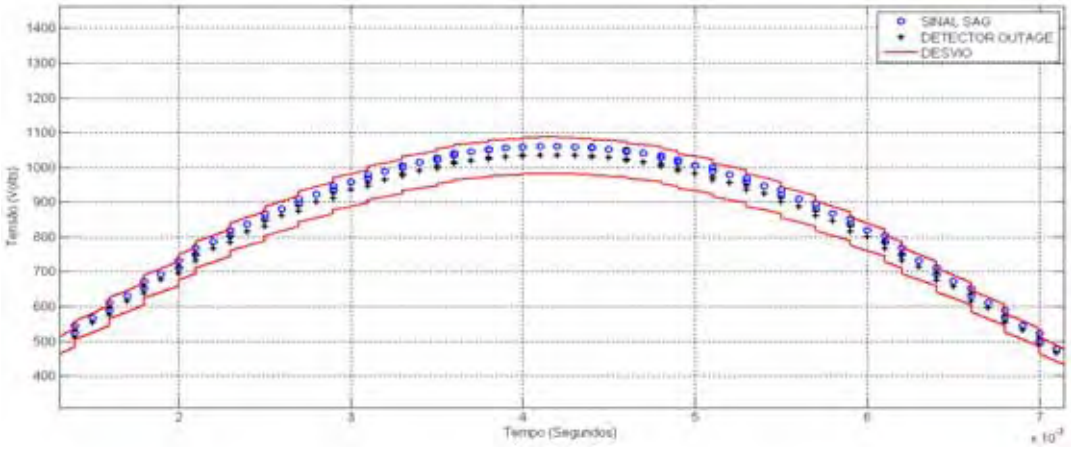
- Os distúrbios *Sag*, *Swell* e *Outage* possuem as mesmas características, diferenciando-se apenas na variação da magnitude da tensão;
- Os distúrbios *Swell*-harmônico e *Sag*-harmônico, também possuem as mesmas características, se diferenciando apenas pela variação da magnitude da tensão;
- Os valores utilizados nos parâmetros das simulações podem gerar sinais de classes diferentes, porém muito semelhantes.

Os erros podem ocorrer, no entanto nos testes realizados observou-se uma semelhança muito grande nos sinais citados anteriormente. Em Tonelli-Neto (2012) foi destacado, que ao extrair características dos sinais utilizando a transformada *wavelet*, alguns sinais (*Sag*, *Sag*-harmônico e *Outage*) apresentavam praticamente os mesmos coeficientes, isto é, são praticamente "gêmeos" pertencendo a classes diferentes. Estes fatos evidenciam e justificam erros obtidos pelos sistemas de diagnóstico.

Neste trabalho observou-se que o desvio ε adotado pode piorar o desempenho do diagnóstico, fazendo que sinais sejam classificados erroneamente. Outra observação, nas simulações realizadas os parâmetros do modelo teórico proposto por (ABDEL-GALIL et al., 2004) podem gerar sinais em classes diferentes, porém com uma enorme semelhança. Por exemplo, o parâmetro α varia de 0,1 a 0,9 para o distúrbio *Sag*, e para o distúrbio *Outage* varia de 0,9 a 1, portanto se nas simulações, um sinal *Sag* é gerado utilizando um $\alpha = 0{,}8$, e um sinal *Outage* é gerado utilizando um $\alpha = 0.9$, os dois sinais irão possuir muita semelhança, sendo considerados praticamente "gêmeos".

Considerando que os sinais possuem magnitudes de tensão próximas, o desvio ε pode contribuir para um erro. Ao utilizar o desvio para aumentar a precisão do detector, estamos expandindo a condição de casamento, proporcionando que sinais praticamente "gêmeos" sejam detectados erroneamente, pois para confirmar um casamento entre um detector e um sinal um número preestabelecido de pontos deve se casar. Na figura 29 ilustra-se um exemplo onde um detector *Outage* se casa (combina) erroneamente com um sinal *Sag*. Neste caso, os limites adotados para o desvio ε fizeram que muitos pontos que não seriam casados, fossem acionados, contribuindo para um erro de classificação.

Figura 29 – Erro de classificação.



Fonte: Elaboração do próprio autor.

Apesar de existir erros no sistema, o mesmo pode ser corrigido utilizando valores precisos, obtidos em uma fase de testes experimental. Para este trabalho o desvio ε não prejudicou o desempenho do sistema, e sim contribuiu para um ótimo índice de acertos.

7.5 Estudo comparativo

Nesta seção apresenta-se um estudo comparativo entre os resultados obtidos neste trabalho com os resultados de referências mais relevantes encontrados na literatura.

O sistema de diagnóstico de distúrbios de tensão apresentado neste trabalho é baseado nos sistemas imunológicos artificiais, em especial no algoritmo de seleção negativa. Este trabalho tem por objetivo utilizar o conceito da descriminação próprio/não-próprio para diferenciar amostras de perturbações, proporcionando um diagnóstico. Caso o sinal seja considerado próprio o mesmo representa a operação normal do sistema, caso contrário, o sinal representa o sistema elétrico sob efeito de uma perturbação.

Na tabela 21 apresenta-se um estudo comparativo entre o acerto total obtido pelo método proposto e os principais métodos disponibilizados na literatura.

Tabela 21 – Estudo comparativo – acerto total.

Referência	Sistema elétrico/modelo teórico	Software	Acerto Total (%)
(LIMA; MINUSSI, 2012)	Sistema de 5 barras	ATP/EMTP	99,30
(LIMA; MINUSSI, 2012)	Sistema de 33 barras	ATP/EMTP	99,51
(LIMA; MINUSSI, 2012)	Sistema de 134 barras	ATP/EMTP	98,97
(LIMA et al., 2012)	Sistema de 33 barras	ATP/EMTP	99,00
(LIMA et al., 2012)	Sistema de 134 barras	ATP/EMTP	97,92
(TONELLI-NETO, 2012)	Sistema de 134 barras	ATP/EMTP	96,77
(BARROS et al., 2012)	Sistema de 134 barras	ATP/EMTP	90,32
(DECANINI et al., 2011)	Sistema de 134 barras	ATP/EMTP	99,66
(ZHANG et al., 2011)	Não especificado	MATLAB/Simulink	99,00
(OLESKOVICZ et al., 2009)	Sistema de 138/13,8 kW	ATP	99,31
(UYAR et al., 2008)	(ABDEL-GALIL et al., 2004).	MATLAB	96,21
Este trabalho	Sistema de 5 barras	ATP/EMTP	99,81
Este trabalho	Sistema de 33 barras	ATP/EMTP	99,58
Este trabalho	Sistema de 84 barras	ATP/EMTP	99,84
Este trabalho	Sistema de 134 barras	ATP/EMTP	99,72

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Através da tabela 21 é possível visualizar que o método apresentado neste trabalho tem um bom índice de acerto total e precisão no diagnóstico de distúrbios de tensão, bem como outros trabalhos da literatura. Os resultados são satisfatórios.

Na tabela 21 a comparação se deu com o índice de acerto total dos métodos. Na sequência são apresentadas as comparações individuais, ou seja, cada classe de distúrbio que foi tratada por este trabalho.

Na tabela 22 apresenta-se um estudo comparativo entre o acerto obtido pelo método proposto para os distúrbios *Swell, Sag* e *Outage* e outros métodos disponíveis na literatura.

Na tabela 23 apresenta-se um estudo comparativo entre o acerto obtido pelo método proposto para os distúrbios *Swell-harmônico e Sag-harmônico* e outros métodos disponíveis na literatura.

Na tabela 24 apresenta-se um estudo comparativo entre o acerto obtido pelo método proposto para os distúrbios harmônico e transitório oscilatório e outros métodos disponíveis na literatura.

Tabela 22 – Estudo comparativo – acerto para os distúrbios s*well, sag e outage*.

Referência	Sistema elétrico/modelo teórico	Acerto (%)		
		Swell	***Sag***	***Outage***
(LIMA; MINUSSI, 2012)	Sistema de 5 barras	100,00	97,22	100,00
(LIMA; MINUSSI, 2012)	Sistema de 33 barras	100,00	98,61	100,00
(LIMA; MINUSSI, 2012)	Sistema de 134 barras	100,00	94,44	100,00
(LIMA et al., 2012)	Sistema de 33 barras	100,00	96,50	100,00
(LIMA et al., 2012)	Sistema de 134 barras	100,00	93,50	100,00
(TONELLI-NETO, 2012)	Sistema de 134 barras	100,00	80,00	100,00
(BARROS et al., 2012)	Sistema de 134 barras	100,00	86,66	50,00
(DECANINI et al., 2011)	Sistema de 134 barras	100,00	98,46	100,00
(OLESKOVICZ et al., 2009)	Sistema de 138/13,8 kW	84,29	97,78	95,00
Este trabalho	Sistema de 5 barras	100,00	100,00	100,00
Este trabalho	Sistema de 33 barras	100,00	100,00	100,00
Este trabalho	Sistema de 84 barras	100,00	100,00	100,00
Este trabalho	Sistema de 134 barras	100,00	100,00	100,00

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 23 – Estudo comparativo – acerto para os distúrbios *swell-harmônico e sag-harmônico*.

Referência	Sistema elétrico/modelo teórico	Acerto (%)	
		Swell-Harmônico	***Sag-Harmônico***
(LIMA; MINUSSI, 2012)	Sistema de 5 barras	100,00	97,91
(LIMA; MINUSSI, 2012)	Sistema de 33 barras	100,00	97,91
(LIMA; MINUSSI, 2012)	Sistema de 134 barras	100,00	97,91
(LIMA et al., 2012)	Sistema de 33 barras	100,00	97,00
(LIMA et al., 2012)	Sistema de 134 barras	100,00	92,00
(TONELLI-NETO, 2012)	Sistema de 134 barras	100,00	95,00
(BARROS et al., 2012)	Sistema de 134 barras	90,90	85,00
(DECANINI et al., 2011)	Sistema de 134 barras	100,00	99,15
(OLESKOVICZ et al., 2009)	Sistema de 138/13,8 kW	-	-
Este trabalho	Sistema de 5 barras	100,00	98,65
Este trabalho	Sistema de 33 barras	100,00	97,08
Este trabalho	Sistema de 84 barras	98,85	100,00
Este trabalho	Sistema de 134 barras	100,00	98,02

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela 24 – Estudo comparativo – acerto para os distúrbios *harmônico e transitório oscilatório*.

Referência	Sistema elétrico/modelo teórico	Acerto (%)	
		Harmônico	***Transitório Oscilatório***
(LIMA; MINUSSI, 2012)	Sistema de 5 barras	100,00	100,00
(LIMA; MINUSSI, 2012)	Sistema de 33 barras	100,00	100,00
(LIMA; MINUSSI, 2012)	Sistema de 134 barras	100,00	100,00
(LIMA et al., 2012)	Sistema de 33 barras	100,00	100,00
(LIMA et al., 2012)	Sistema de 134 barras	100,00	100,00
(TONELLI-NETO, 2012)	Sistema de 134 barras	100,00	100,00
(BARROS et al., 2012)	Sistema de 134 barras	92,00	100,00
(DECANINI et al., 2011)	Sistema de 134 barras	99,73	100,00
(OLESKOVICZ et al., 2009)	Sistema de 138/13,8 kW	93,03	84,28
Este trabalho	Sistema de 5 barras	100,00	100,00
Este trabalho	Sistema de 33 barras	100,00	100,00
Este trabalho	Sistema de 84 barras	100,00	100,00
Este trabalho	Sistema de 134 barras	100,00	100,00

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Nas tabelas 22, 23 e 24 apresentou-se um estudo comparativo entre o acerto obtido pelo método proposto para todas as classes de distúrbios e os métodos mais relevantes disponíveis na literatura. Através deste estudo comparativo é possível observar que o método proposto neste trabalho apresenta resultados equivalentes aos melhores encontrados na literatura, assim pode-se concluir que os resultados obtidos neste trabalho são satisfatórios e apresentam eficiência e segurança.

Além das comparações apresentadas até o momento é possível realizar um estudo comparativo com o tempo de processamento do sistema de diagnóstico. Porém, para que seja realizada uma comparação justa devem-se satisfazer os seguintes requisitos:

- Os métodos serem programados na mesma linguagem de programação;
- Os sistemas serem executados no mesmo computador;
- Os métodos serem aplicados em uma base de dados igual (com a mesma quantidade de amostras).

Satisfazer estes requisitos é difícil, tendo em vista que cada trabalho é realizado de forma diferente. Sendo assim, na sequência apresenta-se um breve estudo comparativo de

tempo de processamento, porém não se pode garantir que um método é melhor que outro, pois foram executados em ambientes (computadores) e conjunto de dados diferentes.

A tabela 25 apresenta um estudo comparativo com o tempo de processamento.

Tabela 25 – Estudo comparativo – tempo de processamento.

Referência	Sistema elétrico/modelo teórico	PC	Tempo por amostra (*m*s)	Tempo total (*m*s)
(LIMA; MINUSSI, 2012)	Sistema de 5 barras	Corel 2 duo 1.9 GHz, 2 GB RAM	0,142	89,20
(LIMA; MINUSSI, 2012)	Sistema de 33 barras		0,146	91,20
(LIMA; MINUSSI, 2012)	Sistema de 134 barras		0,151	94,70
(LIMA et al., 2012)	Sistema de 33 barras		0,137	85,70
(LIMA et al., 2012)	Sistema de 134 barras		0,156	97,40
(TONELLI-NETO, 2012)	Sistema de 134 barras	Core i7-2600, 3.4 GHz, 8 GB RAM	0,929	580,00
Este trabalho	Sistema de 5 barras	Corel 2 duo 1.9 GHz, 2 GB RAM	0,156	97,60
Este trabalho	Sistema de 33 barras		0,141	88,40
Este trabalho	Sistema de 84 barras		0,143	89,40
Este trabalho	Sistema de 134 barras		0,140	87,60

Fonte: Elaboração do próprio autor.

7.6 Comentários

Nesta seção foram apresentados os resultados obtidos pela metodologia proposta em cada um dos testes realizados, uma análise e discussão dos resultados e erros e, por fim, um estudo comparativo com resultados encontrados na literatura.

8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Nesta dissertação foi apresentado um método de detecção e classificação de distúrbios de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica baseado nos sistemas imunológicos artificias. Foram descritas as principais etapas e características do algoritmo de seleção negativa e sua aplicação no problema proposto. Simulações para validação do algoritmo foram realizadas. Como dados de entrada do sistema, o algoritmo precisa apenas dos dados oscilográficos das tensões nas fases medidas na subestação. Por causa da indisponibilidade de se fazer medição em campo, foi utilizado o software ATP/EMTP (EMTP-RV, 2011), próprio para simulação de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos. A fase de geração de detectores demanda maior tempo computacional, mas é executada de forma *off-line* não acarretando prejuízo ao algoritmo. A fase de monitoramento do sistema, a partir da coleta dos dados, é realizada rapidamente (inferior a 100 milésimos de segundo), o que credencia o algoritmo a ser uma ferramenta utilizada em tempo real, já que as decisões precisam ser tomadas rapidamente.

Deve-se destacar que os parâmetros utilizados no algoritmo precisam ser cuidadosamente calibrados, pois um parâmetro mal escolhido pode prejudicar o desempenho do sistema.

A taxa de afinidade deve ser calculada através da relação estatística apresentada em (BRADLEY; TYRRELL,(2002). Utilizando este conceito é possível garantir mais precisão e eficiência no diagnóstico.

A quantidade de detectores gerados na fase de censoriamento do sistema de diagnóstico deve ser escolhida através de um teste experimental, esta quantidade máxima de detectores não deve ultrapassar 30% dos dados. Observou-se nos testes executados neste trabalho que a medida que o conjunto de detectores aumenta, o índice de acerto também aumenta, isto significa que quanto mais informações estiverem disponíveis para serem utilizadas como conhecimento pelo sistema inteligente, melhor será o processo de diagnóstico.

Vale ressaltar que o conjunto de detectores é gerado de forma aleatória, portanto uma vez que se descarta o conjunto detector, ao gerar outro, os resultados podem ser totalmente diferentes dos encontrados anteriormente. Esta propriedade é chamada unicidade, e garante

que cada sistema imunológico artificial seja único, contendo seus conjuntos de detectores. Apesar de existir este conceito, os resultados obtidos são satisfatórios.

O método proposto apresentou excelentes resultados, obtendo um índice médio de acerto de 99,70% em todos os dados dos quatro sistemas elétricos modelados. Nos resultados também é possível visualizar que o sistema é robusto, conseguindo manter um padrão de acerto independentemente do tamanho e característica do sistema elétrico analisado.

Considerando o melhor desempenho, individualmente o sistema obteve 99,70% de acerto para o sistema de 5 barras, 99,55% de acerto para o sistema de 33 barras, 99,85% de acerto para o sistema de 84 barras e 99,70% de acerto para o sistema de 134 barras.

Estes resultados expressam precisão, confiabilidade, robustez e segurança.

Através deste trabalho, conclui-se que os sistemas imunológicos artificiais, com base no algoritmo de seleção negativa, obtiveram um desempenho satisfatório nos testes realizados para os quatro sistemas elétricos propostos, então a metodologia proposta é bastante confiável para a detecção e classificação de distúrbios de tensão.

Apesar dos resultados expressarem eficiência e precisão, podem-se criar outras estratégias para realizar o diagnóstico de distúrbios, melhorando o processo apresentado neste trabalho. Podem ser incorporados ao sistema, conceitos como: lógica *fuzzy*, transformada *wavelet*, redes neurais artificias, teoria da evidência, entre outros. Estes conceitos podem ser agregados ao sistema proporcionando melhoria na análise e processamento de sinais, geração de conhecimento, auxilio na decisão e melhoria no desempenho computacional.

O processo de diagnóstico baseado nos sistemas imunológicos artificiais, apresentado neste trabalho possui algumas vantagens que merecem ser destacadas em relação a outros métodos. Estas vantagens são apresentadas a seguir:

- Diferentemente das redes neurais artificiais os sistemas imunológicos artificiais não possuem fase de treinamento;
- O conhecimento uma vez gerado (conjunto de detectores) não precisa ser zerado para realizar novos testes;
- É possível aplicar o conceito de aprendizagem contínua, ou seja, é possível adicionar novos distúrbios no processo de diagnóstico, sem a necessidade de reiniciar a memória do sistema;
- Os sistemas imunológicos artificiais utilizam o conceito de detecção distribuída, isto possibilita que seja utilizado um conjunto reduzido de informações para realizar o diagnóstico;

8.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para complementar e dar sequência a esta pesquisa, sugerem-se os seguintes tópicos:

- enforcar outras estratégias de sistemas imunológicos, como o algoritmo de seleção clonal e o modelo do perigo;
- agregar um módulo *wavelet* para realizar a análise e processamento dos sinais extraindo coeficientes para serem diagnosticados;
- investigar a possibilidade de aplicação em ambiente de sistemas de distribuição em caráter antecipatório;
- aplicar o método proposto a sistemas de distribuição com cargas não-lineares e geração distribuída;
- aplicar o conceito de aprendizagem contínua, proporcionando que novos distúrbios sejam contemplados, sem a necessidade de reiniciar o processo de aprendizado.

REFERÊNCIAS

ABBAS, A. K.; LICHTMAN, A. H. **Imunologia básica:** funções e distúrbios do sistema imunológico. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007. 247 p.

ABBAS, A. K.; LICHTMAN, A. H.; PILLAI, S. **Imunologia celular e molecular.** 6. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2008. 576 p.

ABDEL-GALIL, T. K.; KAMEL, M.; YOUSSEF, A. M.; EL-SAADANY, E. F.; SALAMA, M. M. A. Power quality disturbance classification using inductive inference approach. **IEEE Transactions on Power Delivery,** New York, v. 19, n. 4, p. 1812-1818, 2004. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1339350>. Acesso em: 25 jun. 2011.

ALAG, S. et al. A methodology for intelligent sensor measurement, validation, fusion, and fault detection for equipment monitoring and diagnosis. **Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing,** Cambridge, v. 15, n. 4, p. 307–320, 2001.

AMIS, G. P.; CARPENTER, G. A. Self-supervised ARTMAP. **Neural Networks,** Oxford, v. 23, n. 2, p. 265-282, 2010.

ATP - ALTERNATIVE TRANSIENTS PROGRAM. **RuleBook.** Canada: EMTP-ATP Users Group, SINTEF Energy Research, 2007.

BARAN, M. E. ; WU, F. F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing. **IEEE Transactions on Power Delivery,** New York, v. 4, n. 2, p. 1401-1407, 1989. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=25627>. Acesso em: 10 jul. 2012.

BARROS, A. C.; TONELLI_NETO, M. S.; DECANINI, J. G. M. S.; MINUSSI, C. R. Diagnóstico de distúrbios de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica usando uma rede neural ARTMAP euclidiana modificada com treinamento continuado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, CBA, 19, 2012, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: UFCG, 2012, p. 4596-4603.

BARROS, A. C. **Detecção e classificação de faltas de alta impedância em sistemas elétricos de potência usando lógica *fuzzy***. 2009. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

BENDER, E. A. **Mathematical methods in artificial intelligence.** Piscataway: The IEEE Press, 1996. 636 p.

BENMOKHTAR, R.; HUET, B. **Neural network combining classifier based on dempster-shafer theory**. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL MULTICONFERENCE ON COMPUTER SCIENCE AND INFORMATION TECHNOLOGY, 2006, p. 3–10. Disponível em: < http://www.proceedings2006.imcsit.org/pliks/186.pdf >. Acesso em: 20 dez. 2012.

BERSINI, H. Immune network and adaptive control. In: PROCEEDINGS OF THE EUROPEAN CONFERENCE ON ARTIFICIAL LIFE, 1, 1991, França. **Proceedings of the…** França: MIT Press, 1991. p. 217-226.

BHENDE, C. N.; MISHRA, S.; PANIGRAHI, B. K. Detection and classification of power quality disturbances using S-transform and modular neural network. **Electric Power Systems Research,** Lausanne, v. 78, n. 1, p. 122-128, 2007. Disponível em: < http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779607000065>. Acessso em: 15 jun. 2011.

BOOLEN, M. H. J. **Solving power quality problems:** voltage sags and interruptions. New York: IEEE Press, 1999. 599 p.

BRADLEY, D. W.; TYRRELL, A. M. Immunotronics - novel finite-state-machine architectures with built-in self-test using self-nonself differentiation. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, New York, v. 6, p. 227-238, 2002. Disponível em: < http://eprints.whiterose.ac.uk/970/1/tyrrellam1.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2011.

CARPENTER, G. A.; GROSSBERG, S.; MARKUZON, N.; REYNOLDS, J. H. ; ROSEN, D. B. Fuzzy ARTMAP: a neural network architecture for incremental supervised learning of analog multidimensional maps. **IEEE Transactions on Neural Networks**, New York, v. 3, n.5, p. 698-713, 1992. Disponível em: < http://cns.bu.edu/Profiles/Grossberg/CarGroMarRey1992IEEETransNN.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2012.

CASTRO, L. N. **Computação natural:** uma jornada ilustrada. São Paulo: Livraria da Física, 2010. 268 p.

CASTRO, L. N.; VON ZUBEN, F. J. Sistemas imunológicos artificiais. **Ciência Hoje,** São Paulo, v. 35, n. 205, 2004.

CASTRO, L. N.; HRUSCHKA, E. R.; ROSATELLI, M. C.; CAMPELLO, R. J. G. B. **Computação natural:** uma breve visão geral. In WORKSHOP EM NANOTECNOLOGIA E COMPUTAÇÃO INSPIRADA NA BIOLOGIA, 1, 2004, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: < http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CDAQFjAA&url=http%3A%2F%2Fengenhariadesistemas.com%2Fapostilas%2F7-introcompunat%2Fdownload&ei=JkkKUevvNYm-9QTah4CQDQ&usg=AFQjCNFwuLn4kZH04rWQ-D_FHcm5acPxLg&bvm=bv.41642243,d.eWU >. Acesso em: 20 dez. 2011.

CASTRO, L. N. ; TIMMIS, J. **Artificial immune systems:** a new computational intelligence approach. New York: Springer, 2002. 357 p.

CASTRO, L. N. ; VON ZUBEN, F. J. AiNet: an Artificial Immune Network for Data Analysis. In: HABASS, H. A.; SARKER, R. A.; NEWTON, C. S. **Data mining:** a heuristic approach. Hershey: Idea Group Publishing, 2002. p. 231–259. Disponível em: < http://www.amazon.com/Data-Mining-Heuristic-Hussein-Abbass/dp/1930708254#reader_1930708254>. Acesso em: 20 mar. 2012.

CASTRO, L. N. **Engenharia imunológica: desenvolvimento e aplicação de ferramentas computacionais inspiradas em sistemas imunológicos artificiais.** 2001. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

CASTRO, L. N.; VON ZUBEN, F. J. The clonal selection algorithm with engineering applications. In: WORKSHOP PROCEEDINGS OF GECCO, WORKSHOP ON ARTIFICIAL IMMUNE SYSTEMS AND THEIR APPLICATIONS, 2000, Las Vegas. **Proceedings of the...** Las Vegas: [S.n.], 2000. p. 36-39. Disponível em: < http://www.dca.fee.unicamp.br/~vonzuben/research/lnunes_dout/artigos/gecco00.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2011.

CASTRO, L. N. ; VON ZUBEN, F. J. An evolutionary immune network for data clustering. In; PROCEEDINGS OF THE BRAZILIAN SYMPOSIUM ON NEURAL NETWORKS, 6, 2000, Rio de Janeiro. **Proceedings of the…** Rio de Janeiro: IEEE, 2000b. p. 84-89. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=889718>. Acesso em: 15 jan. 2012.

CAYZER, S.; AICKELIN, U. The danger theory and its application to artificial immune systems. In PROCEEDINGS INTERNAT CONFERENCE ON ARTIFICIAL IMMUNE SYSTEMS (ICARIS-2002), 1, 2002, Canterbury. **Proceedings of the…** Canterbury: Canterbury University of Kent at Canterbury, 2002. p. 141–148. Disponível em: < http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0801/0801.3549.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2012.

CAZANGI, R. R. **Uma proposta evolutiva para controle inteligente em navegação autônoma de robôs**. 2004. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

CELADA, F. ; SEIDEN, P. E. A computer model of cellular interaction in the immune system. **Immunology Today,** Amsterdam, v. 13, p. 56-62, 1992.

CHANG, C. S.; WEN, F. S. Tabu search based approach to trouble call analysis. **IEE Proceedings of the Generation Transmission Distribution,** New York, v. 145, n. 6, p. 731-738. 1998. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=749176>. Acesso em: 15 abr. 2012.

CHEN, W. H.; Liu, C. W. ; TSAI, M. S. On-line fault diagnosis of distribution substations using hybrid cause-effect network and fuzzy rule-based method. **IEEE Transactions on Power Delivery,** Piscataway, v. 15, n. 2, p. 710-717, 2000. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=00853009>. Acesso em: 15 dez. 2012.

CHIOU, J. P.; CHANG, C. F.; SU, C. T. Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems. **IEEE Transactions on Power Systems,** New York, v. 20, n. 2, p. 668-674, 2005. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1425559>. Acesso em: 12 aug. 2012.

COLORNI, A.; DORIGO, M.; MANIEZZO, V. **Distributed optimization by ant colonies**. In: PROCEEDINGS EUROPEAN CONFERENCE ON ARTIFICIAL LIFE. França: Elsevier, 1992. p. 134-142. Disponível em: <http://iridia.ulb.ac.be/~mdorigo/ACO% -/publications.html>. Acesso em: 15 dez. 2012.

DASGUPTA, D. Advances in artificial immune systems. **IEEE Computational Intelligence Magazine**, New York, v. 1, n. 4, p. 40-49, 2006. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4129847>. Acesso em: 15 dez. 2012.

DASGUPTA, D.; FORREST, S. **Artificial immune systems in industrial applications**. In: PROCEEDINGS OF THE IPMM'99., 1999. Disponível em: < http://ais.cs.memphis.edu/files/papers/IPMM-99.pdf>. Acesso em: 10 set. 2012.

DASGUPTA, D. **Immunity-based intrusion detection systems:** a general framework, 1999. Disponível em: < http://neuro.bstu.by/ai/To-dom/My_research/failed%201%20subitem/For-research/A-immune/AIS-in-general/p11.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2012.

DASGUPTA, D. **Artificial immune systems and their applications.** New York: Springer-Verlag, 1998.

DASGUPTA, D.; ATTOH-OKINE, N. Immunity-based systems: a survey. In: SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS, 1997. 'COMPUTATIONAL CYBERNETICS AND SIMULATION, IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE, 1997, Menphis. **Conference of the...** Menphis: IEEE, 1997. v. 1, p. 369–374, 1997. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=625778>. Acesso em: 20 dez. 2011.

DASH, P. K.; MISHRA, S.; SALAMA, M. M. A.; LIEW, A. C. Classification of power system disturbances using a fuzzy expert system and a fourier linear combiner. **IEEE Transactions on Power Delivery,** New York, v. 15, n. 2, p. 472–477, 2000. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=852971>. Acesso em: 20 jun. 2012.

DARWIN, C. **The origin of species by means of natural selection or the preservation of favored races in the struggle for life.** London, UK: John Murray, 1859 (Reprinted as a Penguin Classics, 1985).

DARWIN, C. AND WALLACE, A.R. **Evolution by Natural Selection.** Cambridge, UK: Cambridge University Press. 1958.

DECANINI, J. G. M. S.; TONELLI-NETO, M. S.; MALANGE, F. C. V. ; MINUSSI, C. R. Detection and classification of voltage disturbances using a fuzzy-ARTMAP-wavelet network. **Electric Power Systems Research,** Lausanne, v. 81, n. 12, p. 2057-2065, 2011.

DECANINI, J. G. M. S. **Detecção e classificação de faltas de curto-circuito em sistemas de distribuição de energia elétrica usando lógica nebulosa.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

DOMMEL, H. W. **EMTP theory book.** [S.l.]: Bonneville Power Administration, 1986. 700 p.

DONGLI, J.; MENG; X. ; SONG, X. Study on technology system of self-healing control in smart distribution grid. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED POWER SYSTEM AUTOMATION AND PROTECTION, 2011, Beijing. **Proceedings of the…** Beijing: IEEE, 2011. p. 26-30. 1-5. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6180379>. Acesso em: 15 jun. 2012.

DORIGO, M.; MANIEZZO, V.; COLORNI, A. Ant system: optimization by a colony of cooperating agents. **IEEE Transactions on Systems**, **Cybernetics,** New York, v. 26, n. 1, p. 29-41, Pt. B, 1996.

DUBÉ, L. How to use MODELS-based user-defined network components in ATP. In: EUROPEAN EMTP USERS GROUP MEETING, 1996, Budapest. **Proceedings of the…** Siegen: EEUG, 1996. p.10–12, 1996.

DUGAN, R. C.; McGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. **Electrical power systems quality.** New York: McGraw-Hill, 1996. 265 p.

EMTP-RV. **Eletromagnetic transient program.** Le Puy-Sainte-Réparade: Powersys-Solutions, France, 2011.

ERISTI, H.; UÇAR, A.; DEMIR, Y. Wavelet-based feature extraction and selection for classification of power system disturbances using support vector machines. **Electric Power System Research,** Lausanne, v. 80, n. 7, p. 743–752, 2010.

FERREIRA, H. M. **Uso de ferramentas de aprendizado de máquina para prospecção de perdas comerciais em distribuição de energia elétrica**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

FORREST, S.; HOFMEYR, S. A. ; SOMAYAJI, A. Computer immunology. **Communications of the ACM,** New York, v. 40, n. 10, p. 88-96. 1997.

FORREST, S. A.; PERELSON, A. L.; CHERUKURI, R. Self-nonself discrimination in a computer. In: PROCEEDINGS OF THE IEEE SYMPOSIUM ON RESEARCH IN SECURITY AND PRIVACY, 1994, Oakland. **Proceedings of the…** Oakland: IEEE, 1994. p. 202-212. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=296580>. Acesso em: 20 jun. 2011.

FORREST, S.; JAVORNIK, B.; SMITH, R. E. ; PERELSON, A. S. Using genetic algorithms to explore pattern recognition in the immune system. **Evolutionary Computation,** Cambridge, v. 1, n. 3, p.191-211, 1993.

FORTE, W. C. N. **Imunologia:** do básico ao aplicado. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2007. 364 p.

FRANÇA, F. O. **Algoritmos bio-inspirados aplicados à otimização dinâmica**. 2005. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

FUKUDA, T.; MORI, K. ; TSUKIAMA, M. Parallel search for multi-modal functio optimization with diversity and learning of immune algorithm. In: DASGUPTA, D. (Ed). **Artificial immune systems and their applications**. New York: Springer-Verlag, 1998. p. 210-220.

FUKUI, C.; KAWAKAMI, J. An expert system for fault section estimation using information from protective relays and circuit breakers. **IEEE Transactions On Power in Delivery,** New York, v. 1, n. 4, p. 83-90, 1986. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4308033>. Acesso em: 20 dez. 2012.

GREENSMITH, J. **The dendritic cell algorithm.** 2007. Phylosophical Doctor (Thesis) - University of Nottingham, Nottinghan, 2007.

GREENSMITH, J.; AICKELIN, U. Dendritic cells for syn scan detection. In GECCO '07: PROCEEDINGS OF THE ANNUAL CONFERENCE ON GENETIC AND EVOLUTIONARY COMPUTATION, 7, 2006, New York. **Proceedings of the…** New York: ACM, 2010. p. 49–56. Disponível em: < http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1002/1002.0276.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2011.

GUIMARÃES, M. A. N. **Reconfiguração de sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando algoritmos de busca tabu**. 2005. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

GUNGOR, V. C.; SAHIN, D.; KOCAK, T.; ERGUT, S.; BUCCELLA, C.; CECATI, C. ; HANCKE, G. P. Smart grid technologies: communication technologies and standards. **IEEE Transactions on Industrial Informatics,** New York, v. 7, n. 4, p. 529-540, 2011. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6011696>. Acesso em: 10 jun. 2012.

HAYKIN, S. **Neural networks**: a comprehensive foundation. New Jersey: Prentice-Hall, Upper Saddle, USA, 1994. 842 p.

HE, H.; STARZYK, J. A. A self-organizing learning array system for power quality classification based on wavelet transform. **IEEE Transactions On Power in Delivery,** New York, v. 21, n. 1, p. 286–295, 2006. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1564211>. Acesso em: 15 set. 2010.

HIGHTOWER, R. R.; FORREST, S.; PERELSON, A. S. The baldwin effect in the immune system: learning by somatic hypermutation. In: BELEW, R. K.; MITCHEL, M. (Ed.). **Adaptive individuals in evolving populations.** New York: Addison-Wesley, 1996. p. 159-167.

HOFFMANN, G. W. A neural network model based on the analogy with the immune system. **Journal of Theoretical Biology,** London, v. 122, p.33-67, 1986.

HOFMEYR, S. A. An interpretative introduction to the immune system. In: COHEN, I.; SEGEL, L. A. (Ed.). **Design principles for the immune system and other distributed autonomous systems.** Oxford: Oxford University Press, 2000.

HOFMEYR, S. A. **An immunological model of distributed detection and its application to computer security.** Tese (Doctor of Philosophy of the Computer Science) — Department of Computer Science - University of the Witwatersrand, Witwatersrand, 1999.

HOFMEYR, S. A.; FORREST, S. **Immunity by design:** an artificial immune system. 1999. p. 1289-1296. Disponível em: < http://www.cyber.st.dhs.gov/docs/Immunity.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2012.

HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems**. Michigan: Ann Arbor, 1975. 211 p.

HUNT, J. E.; COOKE, D. E. ; HOLSTEIN, H. Case memory and retrieval based on the immune system. **Lecture Notes in Artificial Intelligence**, Berlin, v. 1010, p. 205-216, 1995.

HUNT, J. E.; TIMMIS, J.; COOKE, D. E. ;JISYS, C. The development of an artificial immune system for real world applications. In: DASGUPTA, D. (Ed.). **Artificial Immune Systems and Their Applications**. New York: Springer-Verlag, 1998. p.157-186.

JUN, J. H.; LEE, D. W. ; SIM, K. B. Realization of cooperative and swarm behavior in distributed autonomous robotic systems using artificial immune system. In: PROCEEDINGS OF THE SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS, 1999, 6, Tokyo. **Proceedings of the…** Tokyo: IEEE, 1999. p. 614-619. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=816622>. Acesso em: 20 jul. 2012.

KARTALOPOULOS, S. V. **Understanding neural networks and fuzzy logic:** basic concepts and applications. Piscataway: IEEE Press, 1996.

KEZUNOVIC, M.; ABUR, A. Merging the temporal and spatial aspects of data and information for improved power system monitoring applications. **Proceedings of the IEEE,** Piscataway, v. 93, n. 11, p. 1909–1119, 2005. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=01519723>. Acesso em: 15 out. 2012.

KEZUNOVIC, M. Smart fault location for smart grids. **IEEE Transactions on Smart Grid**, Piscataiwai, v. 2, n. 1, p. 11-22, 2011. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=05723781>. Acesso em: 15 set. 2012.

KRISHNA, K. K. ; SATYADAS, A. ; NEIDHOEFER, J. An immune system framework for integrating computational intelligence paradigms with applications to adaptive control. In: PALANISWAMI, M.; ATTIKIOUZEL, Y.; MARKS, R. J. ; FOGEL, D.; FUKUDA, T. (Ed.). **Computational intelligence a dynamic system perspective**. New York: IEEE Press, 1995. p.32-45.

LAPSEE, 2011. Practical 134 bus feeder data. Lines Transactions of the AIEE, part III - **Power Apparatus and Systems,** v. 76, p. 518-539. Disponível em: < http://feis.unesp.br/dee/projetos/lapsee/>. Acesso em: 10 fev. 2011.

LEE, D. W.; JUN, H. B. ; SIM, K. B. Artificial immune system for realization of cooperative strategies and group behavior in collective autonomous mobile robots. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ARTIFICIAL LIFE AND ROBOTICS, 4, 1999, **Proceedings of the…**[S.l]: S.n.], 1999. p. 232-235.

LIMA, F. P. A. ; MINUSSI, C. R. Análise de distúrbios de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica usando o algoritmo de seleção negativa. In: BRAZILIAN CONFERENCE ON INTELLIGENT SYSTEMS – BRACIS-2012, Curitiba. **Encontro Nacional de Inteligência Artificial**. Curitiba: PUC, 2012. p. 1-12.

LIMA, F. P. A.; BARROS, A. C. ; MINUSSI, C. R. Detecção e classificação de distúrbios de tensão em sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando sistemas imunológicos artificiais. ANAIS DO CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 19, 2012, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: UFCG, 2012, p. 3380-3387.

LO, K. L.; NG, H. S.; TRECAT, J. Power system fault diagnosis using Petri nets. **IEE Generation Transmission, Distribution,** London, v. 144, n. 3, p. 231-236, 1997. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=588353>. Acesso em: 20 jun. 2012.

MACHADO, R. B. **Uma abordagem de detecção de intrusão baseada em sistemas imunológicos artificiais e agentes móveis.** 2005. 164 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MALANGE, F. C. V. **Rede neuro-fuzzy-wavelet para detecção e classificação de anomalias de tensão em sistemas elétricos de potência.** 128 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2010.

MALLAT, S. **A wavelet tour of signal processing: the sparse way.** 3. ed. New York: Academic Press, 2009.

MASOUM, M. A. S.; JAMALI, S. ; GRAFFARZADEH, N. Detection and classification of power quality disturbances using discrete wavelet transform and wavelet networks. **IET Science Measurement and Technology,** Stevenage, v. 4, n. 4, p. 193-205, 2010.

MATLAB 7.8 version, MathWorks Company. 2011.

MCDONALD, J. D. **Electric power substations engineering**. New York: CRC Press, 2003.

MEHER, S. K.; PRADHAN, A. K. Fuzzy classifiers for power quality events analysis. **Electric Power Systems Research,** Lausanne, v. 80, p. 71-76, 2010.

MELDA, D. C. **Doenças autoimunes,** 2013. Disponível em: < http://www.infoescola.com/saude/doencas-auto-imunes/>. Acesso em: 15 jan. 2013.

MEYER, W. S. **EMTP Rule Book**. Bonneville: Bonneville Power Administration, 1973.

MINUSSI, C. R. **Desenvolvimento de um sistema especialista para a automação e apoio à tomada de decisão em ambiente de subestações de sistemas de distribuição de energia elétrica.** Ilha Solteira: DEE, 2007. (Projeto ANEEL-Grupo Rede-FEPISA, Relatório Técnico-Científico, Março 2007).

MONSEF, H.; RANJBAR, A. M.; JADID, S. Fuzzy rule-based expert system fault diagnosis. **IEE Proceedings Generation, Transmission, Distribution,** London, v. 144, n. 2, p.186-192, 1997.

NORTHCOTE-GREEN, J.; WILSON, R. **Control and automation of electrical power distribution systems.** New York: Taylor & Francis, 2007.

OLESKOVICZ, M.; COURY, D. V.; FELHO, O. D., USIDA, W. F.; CARNEIRO, A. F. M.; PIRES, L. R. S. Power quality analysis applying a hybrid methodology with wavelet transform and neural networks. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems,** Oxford, v. 31, n. 5, p. 206–212, 2009.

PANIGRAHI, B. K.; PANDI, V. R. Optimal feature selection for classification of power quality disturbances using wavelet packet-based fuzzy k-nearest neighbour algorithm. **IET Generation, Transmission and Distribution**, Stevenage, v. 3, n. 3, p.296–306, 2009. Disponível em: < http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4799006>. Acesso em: 15 out. 2011.

REAZ, M. B. I.; CHOONG, F.; SULAIMAN, M. S.; MOHD-YASIN, F.; KAMADA, M. Expert system for power quality disturbance classifier. **IEEE Transaction on Power Delivery,** Piscataway, v. 22, n.3, p.1979-1988, 2007.

RUSSELL, B. D.; BENNER, C. L. Intelligent systems for improved reliability and failure diagnosis in distribution systems. **IEEE Transactions on Smart Grid**, Piscataway, v. 1, n.1, p. 48-56, 2010.

SALIM, R. H.; OLIVEIRA, K. R. C.; FILOMENA, A. D.; RESENER, M. ; BRETAS, A. S. Hybrid fault diagnosis scheme implementation for power distribution systems automation. **IEEE Transactions on Power Delivery,** New York, v. 23, n. 4, p.1846-1856, 2008.

SANTOSO, S.; POWERS, E. J.; GRADY, W. M.; PARSONS, A. C. Power quality waveform recognition using wavelet-based neural classifier-Part 1: theoretical foundation. **IEEE Transactions on Power Delivery,** New York, v. 15, n. 1, p. 222-228, 2000.

SARLAK, M.; SHAHRTASH, S. M. High impedance fault detection using combination of multi-layer perceptron neural networks based on multi-resolution morphological gradient features of current waveform. **IET Generation, Transmission and Distribution,** Stevenage, v. 5, n. 5, p. 588-595, 2011.

SILVA, G. C. **Detecção de intrusão em redes de computadores:** algoritmo imunoinspirado baseado na teoria do perigo e célula dendríticas. 2009. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

SOMAYAJI, A.; HOFMEYR, S.; FORREST, S. Principles of a computer immune system. In: PROCEEDINGS NSPW'97 OF THE SECOND NEW SECURITY PARADIGMS WORKSHOP, ON NEW SECCURITY PARADGMS, 1997, New York. **Proceedings of the…** New York: ACM, 1997. p. 75–82. Disponível em: < http://delivery.acm.org/10.1145/290000/283742/p75-somayaji.pdf?ip=200.145.242.45&acc=ACTIVE%20SERVICE&CFID=176414725&CFTOKEN=47525960&__acm__=1359647747_b9c968c24c09451fc64cc0a74bfdec31 >. Acesso em: 15 ago. 2012.

SOUZA, F. A. **Detecção de falhas em sistemas de distribuição de energia elétrica usando dispositivos programáveis.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

TIMMIS, J. I. **Artificial immune systems: a novel data analysis technique inspired by the immune network theory.** Tese (Doctor of Philosophy of the University of Wales) — Department of Computer Science, University of Wales, Aberystwyth, 2000.

TONELLI-NETO, M. S.; DECANINI, J. G. M. S. ; MINUSSI, C. R. Detecção e classificação de faltas de curto-circuito em sistemas de distribuição de energia elétrica usando uma rede neural ARTMAP-Fuzzy. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, 10, 2011, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SBA, 2011. v. 1, p. 1-6.

TONELLI-NETO, M. S. **Formulação do controle preventivo em sistemas de distribuição de energia elétrica baseada na lógica fuzzy e redes neurais.** 2012. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

UYAR, M.; YILDRIRIM, S. ;GENCOGLU, M. T. An effective wavelet-based feature extraction method classification of power quality disturbance signals. **Electric Power System Research,** Lausanne, v. 78, n. 10, p.1747-1755, 2008.

WEN, F. S.; CHANG, C. S. Probabilistic approach for fault-section estimation in power systems based on a refined genetic algorithm. **IEE Proceedings Generation, Transmission, Distribution,** London, v. 144, n.2, p.160-168, 1997. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=591208>. Acesso em: 15 jul. 2012.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and control,** New York, v. 8, n.3, p. 338-353, 1995.

ZHANG, M.; LI, K.; HU, Y. A real-time classification method of power quality disturbances. **Electric Power System Research,** Lausanne, v. 81, n.12, p. 660-666, 2011.

APÊNDICE A - PUBLICAÇÕES

De acordo com as exigências do Regulamento do PPGEE (Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica) da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP o aluno do Mestrado deverá ao mínimo ter submetido um artigo completo relacionado com a pesquisa da dissertação, em periódicos, congressos ou eventos similares que possuem corpo técnico de revisores de competência reconhecida pela comunidade científica para realizar a defesa da dissertação. Assim sendo, neste Apêndice são apresentados os artigos completos que foram publicados, aceito para publicação ou submetido relacionados com a pesquisa de mestrado:

1. LIMA, F. P. A.; MINUSSI, C. R. "Diagnostics of Voltage Disturbances in Electric Power Distribution Systems Using Artificial Immune Systems, pp. 1-12. Fevereiro-2013. (Artigo submetido a um Periódico Internancional)

2. LIMA, F. P. A.; LOTUFO, A. D. P; MINUSSI, C. R. "Artificial Immune Systems Applied to Voltage Disturbances Diagnosis in Distribution Electrical Systems". In: **POWERTECH 2013 - Conference of the IEEE Power e Energy Society in Europe**, 2013, Grenoble, France. pg. 1-3. 2013. (Aceito para publicação).

3. LIMA, F. P. A.; BARROS, A. C.; MINUSSI, C. R. "Detecção e Classificação de Distúrbios de Tensão em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Sistemas Imunológicos Artificiais". In: **CBA - Congresso Brasileiro de Automática**, 2012, Campina Grande - Paraíba. Anais do CBA-2012. Vol. 1, pg. 3380-3387. 2012.

4. LIMA, F. P. A.; MINUSSI, C. R. "Análise de Distúrbios de Tensão em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Usando o Algoritmo de Seleção Negativa". In: **BRACIS 2012 - Brazilian Conference on Intelligent Systems, ENIA 2012 - Encontro Nacional de Inteligência Artificial**, 2012, Curitiba. Anais do ENIA-2012. Vol. 1, pg. 1-12. 2012.

Além dos artigos relacionados com a pesquisa de mestrado foram desenvolvidos outros artigos, em paralelo, dentro da linha de pesquisa do grupo de pesquisa com colegas da universidade e laboratório. A seguir apresentam-se os artigos publicados (ou aceitos para publicação).

5. LIMA, F. P. A.; SOUZA, S. S. F.; MINUSSI, C. R.; ROMERO, R. “Compressão de Imagens Digitais com o uso de Redes Neurais Multicamadas e o Algoritmo Backpropagation”. In: **Revista Universitas – Revista do Centro Universitário Católico Salesiano Auxilium** – Araçatuba-SP, v. 1, p. 245-259, 2012.

6. LIMA, F. P. A.; SILVA, J. C.; MINUSSI, C. R.; ESTEVAM, G. P. “Reconhecimento de Tons DTMF com uma rede neural de Kohonen usando Delphi 7.0”. **Universitas - Revista do centro Universitário Católico Salesiano Auxilium** – Araçatuba-SP, v. 1, p. 260-277, 2012.

7. LIMA, F. P. A.; MINUSSI, C. R. “Reconhecimento de Tons DTMF utilizando uma rede neural de Kohonen”. **Revista CIPPUS – UNILASALLE** – Canoas-RS, v. 1, p. 36-48, 2012.

8. SOUZA, S. S. F.; LIMA, F. P. A.; ROMERO, R.; MINUSSI, C. R. “Analisando as técnicas de solução por quadros e o método Simplex quando empregados na resolução do problema de transporte de uma indústria de pneus”. **Revista CIPPUS – UNILASALLE** – Canoas-RS, v. 1, p. 1-24, 2012.

9. LIMA, F. P. A.; SOUZA, S. S. F.; MINUSSI, C. R. e ROMERO, R. “Compressão de Imagens Digitais com o uso de Redes Neurais Artificiais”. In: **Revista Omnia Exatas**, v. 4, p. 26-35, 2011.

10. LIMA, F. P. A.; MINUSSI, C. R.. "Usando uma rede neural de Kohonen para reconhecimento de padrões de som". **Revista Omnia Exatas**, v. 4, p. 19-30, 2011.

11. SOUZA, S. S. F.; LIMA, F. P. A.; ROMERO, R. e MINUSSI, C. R. “Resolução de Problemas de Programação Não Linear com Métodos Unidimensionais Irrestritos”. In: **Revista Omnia Exatas**, v. 4, p. 58-72, 2011.

12. SOUZA, S. S. F.; LIMA, F. P. A.; ROMERO, R. e MINUSSI, C. R. “Programação Linear: Uma Solução Alternativa para o Problema de Transporte”. In: **Revista Omnia Exatas**, v. 4, p. 63-76, 2011.

13. LIMA, F. P. A.; MINUSSI, C. R. “Reconhecimento de padrões de som usando uma rede neural de Kohonen”. In: **X Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações - DINCON 2011**, Aguas de Lindoia. Anais DINCON2011. Águas de Lindoia, 2011. v. 10. p. 1-6.

14. SOUZA, S. S. F.; LIMA, F. P. A.; ROMERO, R. e MINUSSI, C. R. “Resolução de Problemas de Programação Não Linear com Métodos Unidimensionais Irrestritos”. In: **I CPCFAI – Congresso de Pesquisa Cientifica das Faculdades Adamantinenses Integradas**, 2011, Adamantina, anais do I CPCFAI, v. 15, p. 1-14, 2011.

15. SOUZA, S. S. F.; LIMA, F. P. A.; ROMERO, R. e MINUSSI, C. R. “Programação Linear: Uma Solução Alternativa para o Problema de Transporte”. In: **I CPCFAI – Congresso de Pesquisa Cientifica das Faculdades Adamantinenses Integradas**, 2011, Adamantina, anais do I CPCFAI, v. 15, p. 1-13, 2011. (Publicado).

16. LIMA, F. P. A.; SOUZA, S. S. F.; MINUSSI, C. R. e ROMERO, R. “Compressão de Imagens Digitais com o uso de Redes Neurais Artificiais”. In: **I CPCFAI – Congresso de Pesquisa Cientifica das Faculdades Adamantinenses Integradas**, 2011, Adamantina, anais do I CPCFAI, v. 15, p. 1-9, 2011.

17. LIMA, F. P. A.; MINUSSI, C. R. “usando uma rede neural de Kohonen para reconhecimento de padrões de som”. In: I **CPCFAI - Congresso de Pesquisa Científica das Faculdades Adamantinenses Integradas**, 2011, Adamantina. OMNIA ANAIS EXATAS. Adamantina: OMNIA, 2011. v. 15. p. 1-11.

Os artigos 14, 15, 16 e 17 listados acima foram apresentados no I CPCFAI e receberam uma premiação de destaque entre os 10 melhores trabalhos na área de exatas apresentados no evento. Estes trabalhos foram selecionados para publicação na revista Omnia Exatas, gerando as publicações 9, 10, 11 e 12.

ANEXO A – ANATOMIA DO SISTEMA IMUNOLÓGICO BIOLÓGICO

Neste anexo apresenta-se a anatomia do sistema imunológico biológico. Como citado anteriormente no texto, os conceitos biológicos são facilmente encontrados na literatura especializada, tanto em trabalhos relacionados com a aplicação dos sistemas imunológicos artificiais, bem como, livros de biologia que abordam especificamente o sistema imunológico natural.

Neste sentido, visando facilitar ao leitor, neste anexo são apresentados conceitos que servem de base teórica para entender a estrutura e anatomia do sistema imunológico biológico. Todos os dados e conceitos apresentados neste anexo foram retirados ou adaptados dos seguintes livros e trabalhos:

- (ABBAS et al., 2008), disponível em:

  http://books.google.com.br/books?id=kNRgMJELID0C&printsec=frontcover&dq=livro+imunologia+celular+e+molecular+pdf&hl=en&sa=X&ei=9GEyUbDcOqbZ0wG9nYC4Ag&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

- (ABBAS; LICHTMAN, 2007), disponível em:

  http://books.google.com.br/books?id=Xucz-MuYsOgC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

- (de CASTRO, 2001), disponível em:

  http://www.dca.fee.unicamp.br/~vonzuben/research/lnunes_dout/tese/cap_2.pdf

- (MACHADO, 2005), disponível em:

  http://www.inf.ufsc.br/~bosco/grupo/MestradoRenato.pdf

A.1 Estrutura anatômica do sistema imunológico biológico

A anatomia do sistema imunológico biológico é composta por diversas camadas com funções específicas (de CASTRO, 2001), sendo que o aprendizado ocorre no primeiro contato com algum agente infeccioso desconhecido pelo organismo. Após a eliminação da infecção, o

conhecimento é armazenado em forma de memória imunológica, proporcionado uma resposta mais rápida e eficaz em um segundo contato com o mesmo agente (MACHADO, 2005).

O sistema imunológico biológico é composto pelo sistema imune inato e pelo sistema imune adaptativo. Sendo o primeiro de natureza congênita, com uma capacidade limitada em diferenciar agentes infecciosos externos, tendo uma reação semelhante contra a maior parte dos agentes infecciosos. O sistema imune adaptativo se caracteriza pela capacidade de realizar discriminações específicas de agentes externos, proporcionando memória imunológica e produção de respostas especializadas (MACHADO, 2005).

Os principais componentes do sistema imune adaptativo são os linfócitos, destacando-se em particulares, as células T e células B. Existem milhões dessas células circulando pelo corpo por meio do sistema linfático, caracterizando-se como detectores móveis e independentes que cooperam na detecção e eliminação de invasores (MACHADO, 2005; ABBAS et al., 2008).

Na sequência apresenta-se a anatomia do sistema imunológico biológico, incluindo os órgãos e células, e os tipos de defesa presentes no organismo.

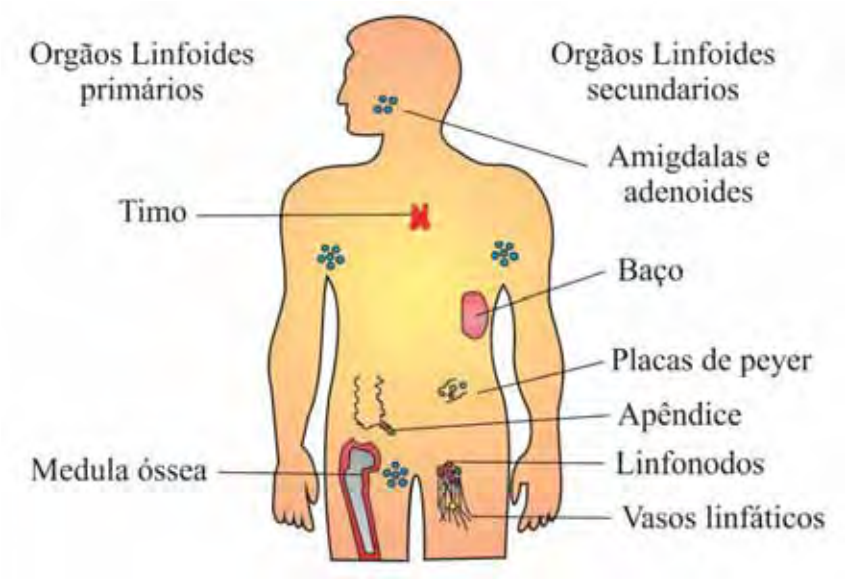
a) Órgãos do sistema imunológico biológico

Os órgãos e tecidos que compõem o sistema imunológico biológico são distribuídos por todo o corpo humano. Estes órgãos pertencem ao sistema linfático, pois estão relacionados com o crescimento, produção e desenvolvimento de linfócitos (de CASTRO; VON ZUBEN, 2004).

Os órgãos linfoides são classificados em primários e secundários. Os primários se responsabilizam pela produção e maturação de linfócitos, incluindo o timo e a medula óssea. Os secundários são responsáveis por estimularem a produção de anticorpos, dentre estes orgãos estão as adenoides, baço, placas de peyer, apêndice, linfonodos e vasos linfáticos (de CASTRO, 2001).

Esse conjunto de órgãos está distribuído pelo corpo humano conforme apresentado na figura A1.

Figura A1 - Anatomia do sistema imunológico biológico.



Fonte: adaptado de (de CASTRO, 2001).

Órgãos linfoides primários: (de CASTRO, 2001).

- Medula óssea: é o local da hematopoese, ou seja, a geração dos elementos celulares do sangue, incluindo as hemácias, os monócitos, os leucócitos polimorfonucleares (granulócitos), os linfócitos B e as plaquetas. Nos mamíferos, a medula óssea é também o sítio de desenvolvimento das células B e a fonte de células-tronco que dão origem aos linfócitos T após a migração para o timo (de CASTRO, 2001);
- Timo: órgão localizado na porção superior do tórax onde ocorre o desenvolvimento das células T. Algumas células migram para o timo a partir da medula óssea, e lá se multiplicam e amadurecem, transformando-se em células T (de CASTRO, 2001).

Órgãos linfoides secundários: (de CASTRO, 2001).

- Amígdalas e Adenoides: constituem grandes agregados de células linfoides organizadas como parte do sistema imune associado a mucosas ou ao intestino (de CASTRO, 2001);
- Linfonodos: atuam como regiões de convergência de um extenso sistema de vasos que coletam o fluido extracelular dos tecidos, fazendo-o retornar para o sangue. Este fluido celular é produzido continuamente por filtragem do sangue e é denominado de linfa. É também o ambiente onde ocorre a resposta imune adaptativa (de CASTRO, 2001);

- Apêndice e Placas de Peyer: linfonodos especializados contendo células imunológicas destinadas a proteção do sistema gastrointestinal (de CASTRO, 2001);
- Baço: é o maior órgão linfoide secundário. É também o único órgão linfoide entreposto na corrente sanguínea constituindo-se, portanto, no local onde os linfócitos combatem os organismos que invadem a corrente sanguínea. Contém uma polpa vermelha responsável pela remoção de células sanguíneas envelhecidas, e uma polpa branca de células linfoides que responde aos antígenos levados ao baço pelo sangue (de CASTRO, 2001);
- Vasos linfáticos: rede de canais que transporta a linfa para o sangue e órgãos linfoides. Os vasos aferentes drenam o líquido dos tecidos e carregam as células portadoras dos antígenos dos locais de infecção para os órgãos linfáticos (linfonodos). Nos linfonodos, as células apresentam o antígeno aos linfócitos que estão recirculando, os quais elas ajudam a ativar. Uma vez que estes linfócitos específicos passaram por um processo de proliferação e diferenciação, eles deixam os linfonodos como células efetoras através dos vasos linfáticos eferentes (de CASTRO, 2001).

b) Imunidade inata e Imunidade adquirida

Os mecanismos de defesa do corpo humano são constituidos pela imunidade inata e pela imunidade adquirida. A imunidade inata é responsável pela proteção inicial contra infecções, e a imunidade adquirida, que se desenvolve mais lentamente, é responsável pela defesa mais tardia e mais eficaz contra as infecções (ABBAS; LICHTMAN, 2007).

A expressão imunidade inata (também chamada de imunidade natual ou nativa), refere-se ao fato de que esse tipo de defesa está sempre presente nos individuos saudáveis, estando preparada para bloquear a entrada de agentes infecciosos e para eliminar rapidamente aqueles que conseguem entrar nos tecidos do corpo humano (ABBAS; LICHTMAN, 2007).

A imunidade adquirida (também chamada de imunidade específica ou adaptativa) é o tipo de desefesa estimulado pelos agentes infeccioso que invadem os tecidos, adaptando-se à presença dos invasores (ABBAS; LICHTMAN, 2007).

A imunidade inata representa a herança genética que todos recebem ao nascer. Esta é a primeira linha de defesa após a entrada do agente infeccioso no organismo. A resposta gerada

pelo sistema imune inato é bem rápida, o que proporciona mais tempo ao sistema imune adaptativo para gerar sua resposta (MACHADO, 2005).

A primeira linha de defesa da imunidade natural é fornecida pelas barreiras epiteliais (tecidos que forma a pele humana), células especializadas e antibióticos naturais presentes nos eptélitos, que bloqueiam a entrada dos agentes infecciosos. Se esses agentes infecciosos penetrarem o epitélio e entrarem nos tecidos ou na circuilação eles são atacados pelos fagócitos, linfócitos especializados, e diversas proteinas plasmáticas (ABBAS; LICHTMAN, 2007).

A imunidade adquirida ou imunidade adaptativa permite ao organismo aprender a reconhecer tipos específicos de agentes infecciosos e armazenar o conhecimento em memórias imunológicas para futuras respostas a um mesmo tipo de agente (MACHADO, 2005). O processo de aprendizagem ocorre no primeiro contato com o agente desconhecido, sendo que nesta etapa a resposta é mais lenta, e em uma nova exposição ao mesmo tipo de agente infeccioso a resposta torna-se mais rápida (HOFMEYR, 2000).

Os dois sistemas (inato e adaptativo) dependem da atividade das células brancas (leucócitos). O sistema imune inato tem como principais elementos os macrófagos e granulócitos, e o sistema imune adaptativo os linfócitos, em especial as células B e T. Todo processo realizado pelo sistema imunológico adaptativo está relacionado com as células B e as células T, as quais são responsáveis pela detecção, geração de anticorpos e a incorporação do conhecimento (de CASTRO, 2001).

O grau e duração de uma resposta imunológica esta relacionado com dois fatores, sendo o tipo do antígeno e a sua quantidade. A intensidade da resposta imunológica depende da hereditariedade, sendo que alguns organismos possuem uma resposta forte para alguns antígenos, enquanto que em outros a resposta é fraca. As crianças recém-nascidas possuem respostas imunológicas fracas, entretanto estão protegidas nos primeiros meses de vida pela imunidade natural passiva recebida de sua mãe, atraves do leite materno e um conjunto de anticorpos presentes na placenta (MACHADO, 2005; de CASTRO, 2001).

A imunidade pode ser reforçada por intermédio de vacinas que imunizam o indivíduo em relação a um agente infeccioso específico (ABBAS et al., 2008).

ANEXO B – DISCRIMINAÇÃO DO PRÓPRIO E NÃO-PRÓPRIO NO SISTEMA IMUNOLÓGICO BIOLÓGICO

Neste anexo apresenta-se o processo de discriminação próprio/não-próprio do sistema imunológico biológico. Este processo é facilmente encontrado na literatura especializada, tanto em trabalhos relacionados com a aplicação dos sistemas imunológicos artificiais, bem como, livros de biologia que abordam especificamente o sistema imunológico natural.

Visando proporcionar facilidade e praticidade ao leitor, neste anexo, são apresentados estes conceitos, que servem de base teórica para entender o processo de discriminação próprio/não-próprio do sistema imunológico biológico. O processo de discriminação próprio/não-próprio é a essência do algoritmo de seleção negativa, que foi apresentado e utilizado neste trabalho. Todos os dados e conceitos apresentados neste anexo foram extraídos ou adaptados dos seguintes livros, trabalhos e artigos:

- (ABBAS; LICHTMAN, 2007), disponível em:

  http://books.google.com.br/books?id=Xucz-MuYsOgC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

- (de CASTRO, 2001), disponível em:

  http://www.dca.fee.unicamp.br/~vonzuben/research/lnunes_dout/tese/cap_2.pdf

- (MACHADO, 2005), disponível em:

  http://www.inf.ufsc.br/~bosco/grupo/MestradoRenato.pdf

- (MELDA, 2013), disponível em:

  http://www.infoescola.com/saude/doencas-auto-imunes/

B.1 Discriminação próprio/não-próprio

A capacidade de o sistema imunológico reconhecer e neutralizar agentes infecciosos no organismo depende diretamente da habilidade de detectar elementos não-próprios nocivos ao sistema. Em (HOFMEYR; FORREST, 1999) destacam-se alguns fatores que tornam este

processo de reconhecimento de elementos não-próprios muito complexo, que são apresentados na sequência:

- o número de padrões não-próprios no organismo humano (aproximadamente 10^{16}) é bem maior que o número de padrões próprios (aproximadamente 10^{6});
- o ambiente é altamente distribuído;
- o organismo deve continuar funcionando;
- os recursos disponíveis para combater os agentes infecciosos agressores são escassos.

Como é possível observar a quantidade de padrões próprios no organismo representa aproximadamente 37% dos padrões não-próprios, então para contornar esta complexidade, o sistema imunológico biológico é disposto de forma distribuída, em várias camadas de defesa, e com funções específicas que permitem identificar todos elementos não-próprios, discriminado os mesmos dos elementos próprios.

O sistema imunológico biológico possui a capacidade de reconhecer praticamente 100% dos antígenos presentes no organismo. As moléculas de anticorpos e os receptores de linfócitos T podem, em essência, reconhecer qualquer molécula própria ou não-própria no organismo, até mesmo aquelas artificialmente sintetizadas (de CASTRO, 2001).

Para que o sistema imunológico funcione apropriadamente, é preciso que ele seja capaz de distinguir as células e moléculas do próprio organismo, chamadas de “próprias”, e moléculas estranhas, chamadas “não-próprio”, que são, a princípio, indistinguíveis. Se o sistema imunológico não for capaz de fazer esta distinção, então uma resposta imunológica será desencadeada contra os elementos próprios, causando doenças autoimunes. A ausência de resposta contra um elemento próprio é chamada de tolerância ao próprio (de CASTRO, 2001).

O sistema imunológico possui um mecanismo conhecido por seleção negativa, que tem como função evitar que os linfócitos autoespecíficos (autorreativos) se tornem autoagressivos, ou seja, evitar que os linfócitos sejam acionados para neutralizar elementos próprios do organismo, como se fossem agentes infecciosos (de CASTRO, 2001).

B.2 Princípio de seleção negativa

O princípio da seleção negativa permite o controle dos linfócitos B e T que possuem receptores não-próprios, de forma que linfócitos com essa característica são eliminados (de CASTRO, 2001)

A seleção negativa pode ocorrer nos órgãos linfoides centrais ou periféricos. Os órgãos linfoides primários são projetados para não permitir a entrada de elementos próprios, enquanto os órgãos linfoides secundários são projetados para filtrar e concentrar os elementos não-próprios, promovendo reações coestimulatórias a uma resposta imunológica (de CASTRO, 2001; MACHADO, 2005).

A seleção negativa das células T ocorre dentro do Timo. O Timo é composto por uma grande quantidade de células acessórias, tais como macrófagos, células dendríticas e células epiteliais especializadas. O timo é protegido por uma barreira sanguínea que faz com que as células acessórias apresentem os complexos MHC/peptídeo de elementos próprios, primeiramente, ao repertório de células T que está sendo formado. A interação das células T imaturas como os ligantes do MHC/peptídeo dos elementos próprios resulta na morte (deleção clonal) daquelas células T que forem autorreativas (de CASTRO, 2001; MACHADO, 2005).

A tolerância promovida pelas células T seria insuficiente para a proteção contra doenças autoimunes. Células B imaturas dentro da medula óssea também são sensíveis a uma indução de tolerância por seleção negativa, caso elas encontrem um antígeno na ausência dos sinais coestimulatórios liberados principalmente pelas células T (de CASTRO, 2001; MACHADO, 2005).

O princípio de seleção negativa deu origem ao algoritmo de células tímicas ou simplesmente algoritmo de seleção negativa (de CASTRO, 2001).

B.3 Autoimunidade

A autoimunidade é uma falha em uma divisão funcional do sistema imunológico biológico (princípio de seleção negativa), e é definida como uma resposta imune contra os elementos próprios do organismo e é uma causa importante de doenças. É estimado que no mínimo entre 1% e 2% dos indivíduos sofram de doenças autoimunes, embora na maioria dos casos as doenças associadas a uma resposta imune descontrolada sejam chamadas de autoimunes sem qualquer evidência formal de que as respostas sejam direcionadas contra os elementos próprios do organismo (ABBAS; LICHTMAN, 2007).

Os principais fatores no desenvolvimento da autoimunidade são: a herança de genes suscetíveis, que podem contribuir para a quebra da autotolerância e estímulos do meio, como infecções, que podem ativar os linfócitos autorreativos (ABBAS; LICHTMAN, 2007).

A autoimunidade pode resultar na produção de anticorpos, ou na ativação de células T reativas aos elementos do próprio corpo. Estes anticorpos e células T podem causar danos aos

tecidos do organismo, proporcionando doenças, que são conhecidas como autoimunes (ABBAS; LICHTMAN, 2007).

Atualmente existem pouco mais do que 30 doenças autoimunes conhecidas, onde cada uma possui sintomas e características específicas, e se manifestam em órgãos distintos, estas doenças são listadas a seguir: (MELDA, 2013; ABBAS; LICHTMAN, 2007).

1. Diabetes mellitus tipo 1;
2. Artrite Reumatoide;
3. Lúpus eritematoso sistêmico;
4. Doença de Crohn;
5. Doença de Reiter;
6. Tireoidite autoimune;
7. Espondilite Anquilosante;
8. Retocolite Ulcerativa;
9. Síndrome de Churg-Strauss;
10. Síndrome de Behçt;
11. Sarcoidose;
12. Esclerose Múltipla;
13. Tireoidite de Hashimoto;
14. Miastenia gravis;
15. Síndrome de Sjögren;
16. Vitiligo;
17. Psoríase;
18. Doenças Autoimunes do Sistema Nervoso;
19. Doença de Addison;
20. Anemia hemolítica;
21. Autoimune Síndrome Antifosfolipídica;
22. Dermatite Herpetiforme;
23. Febre Familiar do mediterrâneo;
24. Glomerulonefrite por IGA;
25. Glomerulonefrite Membranosa;
26. Síndrome de Goodpasture;
27. Doença de Graves;
28. Oftalmopatia de Graves;
29. Doença Celíaca;
30. Hepatite autoimune;
31. Síndrome miastênica de Lambert-Eaton;
32. Oftalmia Simpática;
33. Penfigoide Bolhoso Poliendocrinopatias;
34. Púrpura autoimune;
35. Trombocitopenia Idiopática.

ANEXO C – PROPRIEDADES DO SISTEMA IMUNOLÓGICO BIOLÓGICO

Neste anexo apresentam-se as propriedades do sistema imunológico biológico. Estas propriedades podem ser facilmente encontradas na literatura especializada, em trabalhos relacionados com a aplicação dos sistemas imunológicos artificiais, bem como livros de biologia que abordam especificamente o sistema imunológico natural.

Visando facilitar ao leitor, neste anexo são apresentadas estas propriedades que servem de base teórica para entender os sistemas imunológicos artificiais. Todas as propriedades e conceitos apresentados neste anexo foram retirados ou adaptados dos seguintes livros e trabalhos:

- (ABBAS; LICHTMAN, 2007), disponível em:

  http://books.google.com.br/books?id=Xucz-MuYsOgC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

- (SOMAYAJI et al., 1997)., disponível em:

  https://projetos.inf.ufsc.br/arquivos_projetos/projeto_144/Resumo%20-%20Princ%edpios%20de%20um%20Sistema%20Imunol%f3gico%20Computacional.doc

- (MACHADO, 2005), disponível em:

  http://www.inf.ufsc.br/~bosco/grupo/MestradoRenato.pdf

C.1 Propriedades do sistema imunológico biológico

Para garantir uma defesa eficaz o sistema imunológico biológico conta com quatro propriedades: detecção, diversidade, aprendizado e tolerância. Estas propriedades foram definidas em (HOFMEYR; FORREST, 1999).

a) Detecção

O processo de reconhecimento de padrões é realizado por meio do estabelecimento de ligações químicas e físicas entre os receptores das células imunológicas e os epítopos

localizados na superfície dos agentes patogênicos (TIMMIS, 2000). A força de ligação ou qualidade de reconhecimento entre um receptor e um epítopo é conceituada como afinidade. Essa característica torna o receptor específico por poder ligar-se a poucos epítopos. Da mesma forma, os linfócitos são específicos para determinados tipos de epítopos, pois possuem receptores idênticos; o que é classificado como monoespecificidade. Por outro lado, as patogenias possuem distintos e múltiplos epítopos e, por conseguinte diferentes linfócitos podem ser específicos para a mesma patogenia (MACHADO, 2005).

A ativação dos linfócitos é efetivada quando os receptores conectados excedem um montante e caso sua afinidade seja compatível com a patogenia (MACHADO, 2005).

b) Diversidade

A detecção no sistema imunológico biológico está relacionada com os elementos não-próprios, de forma que o sistema imunológico biológico deve ter diversidade suficiente de linfócitos receptores para assegurar a reação aos elementos patogênicos. Essa geração de elementos diversos é um problema porque o corpo humano não gera tantas proteínas quanto os possíveis agentes patogênicos. Como solução para essa questão, o sistema imunológico biológico promove uma renovação constante de linfócitos. Com isso gera-se uma proteção dinâmica, onde os novos linfócitos possuem uma memória imunológica que torna mais rápida e eficaz a proteção contra os elementos não-próprios (MACHADO, 2005; SOMAYAJI et al., 1997).

c) Aprendizado

O crescimento exponencial das patogenias exige que o sistema imunológico biológico seja capaz de detectar e eliminar rapidamente esses intrusos. O sistema imunológico biológico possui características (HOFMEYR, 2000) que permitem a aprendizagem dos linfócitos (HOFMEYR; FORREST, 1999), sua adaptação a estruturas estrangeiras específicas e capacidade para lembrar esses padrões rapidamente. Esses preceitos são executados pelas células B (HOFMEYR; FORREST, 1999), que quando ativadas sofrem um processo de clonagem associado a uma possível mutação para gerar novas células B que possuam receptores distintos da célula original e, por conseguinte, diferentes afinidades. Quanto maior essa afinidade, mais semelhante é o clone e mais eficiente é o linfócito na eliminação da infecção. Esse aspecto ganha ênfase quando há uma concorrência entre a reprodução da patogenia e das células B, de forma que o sistema vencedor é aquele onde as células B

proliferam mais rápido que os patógenos. A retenção da informação codificada nas células B constitui a memória imunológica, possibilitando uma reação mais rápida da segunda vez que a mesma patogenia ou outra similar seja encontrada (MACHADO, 2005; SOMAYAJI et al., 1997).

d) Tolerância

As moléculas que assinalam uma célula como própria são codificadas em seções do cromossoma MHC, diversidade conhecida como polimorfismo. Essas moléculas determinam a qual antígeno um organismo é capaz de reagir e com qual intensidade. Essa propriedade permite que as células imunológicas se reconheçam mutuamente e comuniquem-se (HOFMEYR, 2000; MACHADO, 2005).

C.2 Princípios da organização do sistema imunológico biológico

Alguns estudos de conceitos imunológicos permitiram definir um conjunto de propriedade que proporcionam uma inspiração em aplicações em outras áreas do conhecimento (SOMAYAJI et al., 1997; ABBAS; LICHTMAN, 2007).

- Distribuição: Os linfócitos são capazes de determinar o local da presença de infecções sem a necessidade de uma coordenação centralizada. Essa característica indica a inexistência de um ponto central de falha, garantindo maior robustez. Adicionalmente, o sistema imunológico biológico age em diferentes localidades paralelamente, constituindo assim uma arquitetura distribuída (MACHADO, 2005; SOMAYAJI et al., 1997);
- Multicamadas: A segurança do sistema imunológico biológico é obtida por meio de um sistema integrado de defesa composto por um grande número de células e moléculas que atuam cooperativamente. Cada uma dessas camadas possui uma especialidade (MACHADO, 2005; SOMAYAJI et al., 1997);
- Diversidade: O sistema imunológico biológico é diversificado, isto é, não existem dois organismos com o mesmo sistema imunológico. Essa característica propicia robustez à população, pois os indivíduos de uma população não são vulneráveis às mesmas patogenias. Como o sistema imunológico é individual e os componentes são diferentes, é possível oferecer diversos modelos de reconhecimento para uma variedade de patogenias (MACHADO, 2005; SOMAYAJI et al., 1997);

- Robustez e Tolerância a Falhas: Nenhuma célula isolada do sistema imunológico biológico é essencial e por isso pode ser substituída, caso seja infectada ou morta, sem comprometer o funcionamento do sistema. Esse princípio é possível em função da disponibilidade das células imunológicas e pela ausência de um controle hierárquico centralizado. Essas características tornam o sistema imunológico biológico robusto e tolerante a falhas (MACHADO, 2005; ABBAS; LICHTMAN, 2007);
- Autonomia: O sistema imunológico biológico, de forma geral, não requer gerenciamento ou manutenção externa e possui a capacidade para autonomamente detectar, classificar e eliminar os agentes patogênicos, assim como efetuar a remoção e substituição de células danificadas (MACHADO, 2005; SOMAYAJI et al., 1997);
- Adaptabilidade e Memória Imunológica: Este princípio revela a capacidade que o sistema imunológico biológico possui para aprender durante a detecção de novos patógenos. O conhecimento sobre o invasor é armazenando em uma memória, denominada memória imunológica, que está presente nas células B (ABBAS; LICHTMAN, 2007; SOMAYAJI et al., 1997);
- Autoproteção: Qualquer célula do corpo pode ser atacada por um agente patogênico, incluindo as próprias células do sistema imunológico. Entretanto, como os linfócitos também são células, que podem proteger o organismo contra outros linfócitos comprometidos por patógenos (MACHADO, 2005; ABBAS; LICHTMAN, 2007);
- Mudanças Dinâmicas: visando maximizar a capacidade de detecção, o sistema imunológico biológico mantém uma amostra aleatória de detectores que circulam pelo corpo. Essa amostra é constantemente renovada por meio da morte de células e da produção de novas células (MACHADO, 2005; ABBAS; LICHTMAN, 2007; SOMAYAJI et al., 1997);
- Identidade por meio do Ambiente: A identificação das células imunológicas é obtida por intermédio de sua exposição a peptídeos ou proteínas fragmentadas, uma vez que as proteínas podem passar através do corpo e os peptídeos servem como identificadores do ambiente (MACHADO, 2005; ABBAS; LICHTMAN, 2007; SOMAYAJI et al., 1997);
- Detecção por Anomalia: O sistema imunológico biológico aplica diversos mecanismos que permitem a detecção de uma variedade de patogenias por meio da

identificação de atividades não usuais anômalas. Essa característica torna possível a detecção de intrusões e violações desconhecidas (MACHADO, 2005; ABBAS; LICHTMAN, 2007; SOMAYAJI et al., 1997);

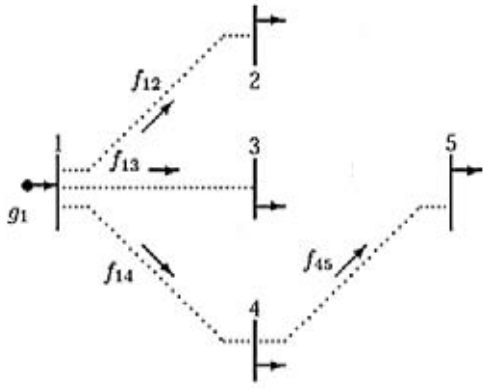
- Especificação de Política Implícita: A definição de próprio pelo sistema imunológico biológico é empiricamente definida. Os componentes desse conjunto são determinados pelo monitoramento das proteínas que estão atualmente no corpo. A vantagem dessa abordagem é que o conjunto próprio são os componentes disponíveis atualmente, sem a preocupação com os elementos que deveriam estar disponíveis (MACHADO, 2005; ABBAS; LICHTMAN, 2007; SOMAYAJI et al., 1997);
- Flexibilidade: O sistema imunológico biológico flexibiliza a alocação de recursos para a proteção do corpo em função da severidade da infecção. Para isso há um aumento da geração de componentes (MACHADO, 2005; ABBAS; LICHTMAN, 2007; SOMAYAJI et al., 1997);
- Crescimento: A perspectiva de processamento distribuído presente no sistema imunológico biológico permite sua expansão. A comunicação e interação entre todos os componentes são localizadas, e o aumento dos componentes ocorre somente em locais onde existe infecção, de maneira que a sobrecarga no sistema seja pequena (MACHADO, 2005; ABBAS; LICHTMAN, 2007; SOMAYAJI et al., 1997).

ANEXO D – DADOS DOS SISTEMAS TESTES

D.1 Sistema de 5 barras

O sistema de 5 barras é um sistema teste trifásico e radial que possui 4 barras de carga, 1 subestação e 4 circuitos, tem como tensão base 11,5 kV, e as condições de carga total ativa e reativa são de 15,3 kW e 8,8 kVAr. Na figura D1 apresenta-se o diagrama unifilar do alimentador de distribuição de energia elétrica de 5 barras (LIMA; MINUSSI, 2012).

Figura D1 – Alimentador de energia elétrica de 5 barras.



Fonte: (LIMA; MINUSSI, 2012, p. 12).

Os dados das barras e dos circuitos do sistema de 5 barras são apresentados na tabelas D1 e D2 respectivamente.

Tabela D1 – Dados das barras do sistema de 5 barras.

Barra	Potência Ativa Demanda (kW)	Potência Reativa Demanda (kVAr)	S (kVA)
1	0	0	5000
2	10000	5000	-
3	3000	2000	-
4	1000	650	-
5	800	500	-

Fonte: (LIMA; MINUSSI, 2012)

Tabela D2 – Dados dos circuitos do sistema de 5 barras.

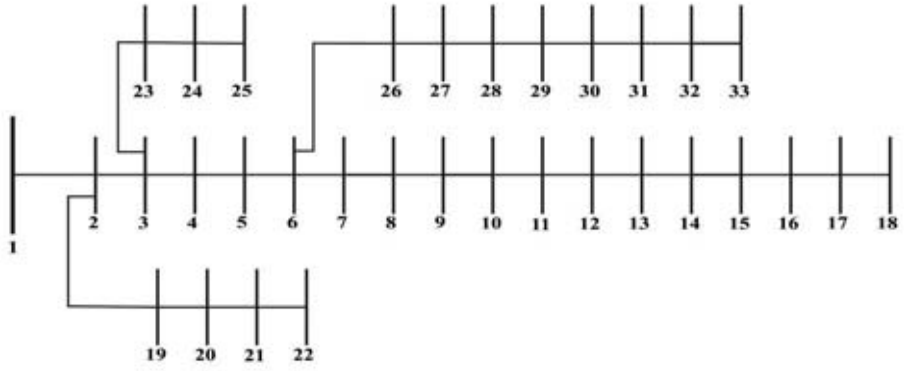
Circuito	De	Para	Resistência do circuito (Ω)	Reatância do circuito (Ω)
1	1	2	0,2	0,25
2	1	3	0,3	0,5
3	1	4	0,1	0,15
4	4	5	0,15	0,28

Fonte: (LIMA; MINUSSI, 2012)

D.2 Sistema de 33 barras

O sistema de 33 barras é um sistema teste trifásico e radial que possui 32 barras de carga, 1 subestação e 32 circuitos, tem como tensão base 12,66 kV, e as condições de carga total ativa e reativa são de 3.715 kW e 2.315 kVAr. Na figura D2 apresenta-se o diagrama unifilar do alimentador de distribuição de energia elétrica de 33 barras (BARAN; WU, 1989).

Figura D2 – Alimentador de energia elétrica de 33 barras.



Fonte: Adaptado de Guimarães (2005, p. 54).

Os dados das barras e dos circuitos do sistema de 33 barras são apresentados nas tabelas D3 e D4 respectivamente.

Tabela D3 – Dados das barras do sistema de 33 barras.

Barra	Potência Ativa Demanda (kW)	Potência Reativa Demanda (kVAr)	S (kVA)
0	0	0	5000
1	100	60	-
2	90	40	-
3	120	80	-
4	60	30	-
5	60	20	-
6	200	100	-
7	200	100	-
8	60	20	-
9	60	20	-
10	45	30	-
11	60	35	-
12	60	35	-
13	120	80	-
14	60	10	-

Continua...

Barra	Potência Ativa Demanda (kW)	Potência Reativa Demanda (kVAr)	S (kVA)
15	60	20	-
16	60	20	-
17	90	40	-
18	90	40	-
19	90	40	-
20	90	40	-
21	90	40	-
22	90	50	-
23	420	200	-
24	420	200	-
25	60	25	-
26	60	25	-
27	60	20	-
28	120	70	-
29	200	600	-
30	150	70	-
31	210	100	-
32	60	40	-

Fonte: (BARAN; WU, 1989)

Tabela D4 – Dados dos circuitos do sistema de 33 barras.

Circuito	De	Para	Resistência do circuito (Ω)	Reatância do circuito (Ω)
1	0	1	0,0922	0,0470
2	1	2	0,4930	0,2511
3	2	3	0,3660	0,1864
4	3	4	0,3811	0,1941
5	4	5	0,8190	0,7070
6	5	6	0,1872	0,6188
7	6	7	0,7114	0,2351
8	7	8	1,0300	0,7400
9	8	9	1,0440	0,7400
10	9	10	0,1966	0,0650
11	10	11	0,3744	0,1238
12	11	12	1,4680	1,1550
13	12	13	0,5416	0,7129
14	13	14	0,5910	0,5260
15	14	15	0,7463	0,5450
16	15	16	1,2890	1,7210
17	16	17	0,7320	0,5740
18	17	18	0,1640	0,1565

Continua...

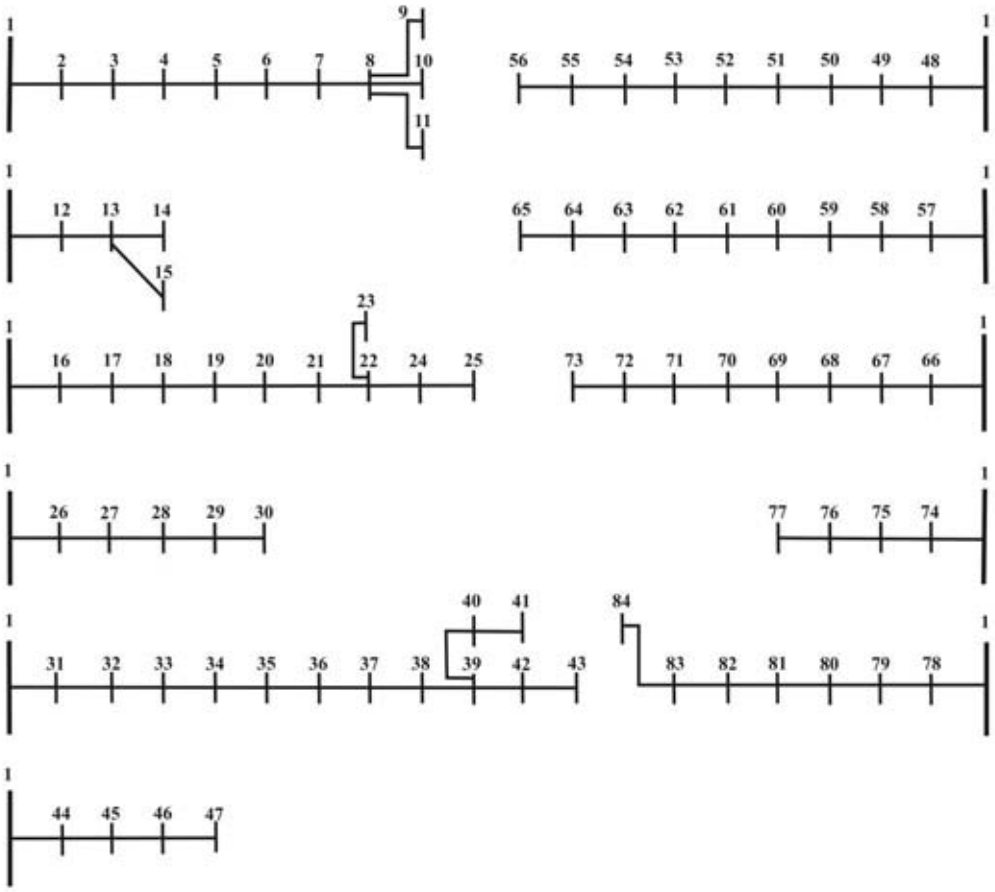
Circuito	De	Para	Resistência do circuito (Ω)	Reatância do circuito (Ω)
19	2	19	15,042	13,554
20	19	20	0,4095	0,4784
21	20	21	0,7089	0,9373
22	21	22	0,4512	0,3083
23	3	23	0,8980	0,7091
24	23	24	0,8960	0,7011
25	24	25	0,2030	0,1034
26	6	26	0,2842	0,1447
27	26	27	1,0590	0,9337
28	27	28	0,8042	0,7006
29	28	29	0,5075	0,2585
30	29	30	0,9744	0,9630
31	30	31	0,3105	0,3619
32	31	32	0,3410	0,5302

Fonte: (BARAN; WU, 1989)

D.3 Sistema de 84 barras

O sistema de 84 barras é um sistema teste trifásico e radial que possui 83 barras de carga, 1 subestação e 83 circuitos, tem como tensão base 11,4 kV, e as condições de carga total ativa e reativa são de 28.350 kW e 20.700 kVAr. Na figura D3 apresenta-se o diagrama unifilar do alimentador de distribuição de energia elétrica de 84 barras (CHIOU et al., 2005).

Figura D3 – Alimentador de energia elétrica de 84 barras.



Fonte: Adaptado de Guimarães (2005, p. 58).

Os dados das barras e dos circuitos do sistema de 84 barras são apresentados nas tabelas D5 e D6 respectivamente.

Tabela D5 – Dados das barras do sistema de 84 barras.

Barra	Potência Ativa Demanda (kW)	Potência Reativa Demanda (kVAr)	S (kVA)
0	0	0	5000
1	0	0	-

Continua...

Barra	Potência Ativa Demanda (kW)	Potência Reativa Demanda (kVAr)	S (kVA)
2	100	50	-
3	300	200	-
4	350	250	-
5	220	100	-
6	1100	800	-
7	400	320	-
8	300	200	-
9	300	230	-
10	300	260	-
11	0	0	-
12	1200	800	-
13	800	600	-
14	700	500	-
15	0	0	-
16	300	150	-
17	500	350	-
18	700	400	-
19	1200	1.000	-
20	300	300	-
21	400	350	-
22	50	20	-
23	50	20	-
24	50	10	-
25	50	30	-
26	100	60	-
27	100	70	-
28	1.800	1.300	-
29	200	120	-
30	0	0	-
31	1800	1600	-
32	200	150	-
33	200	100	-
34	800	600	-
35	100	60	-
36	100	60	-
37	20	10	-
38	20	10	-
39	20	10	-
40	20	10	-
41	200	160	-
42	50	30	-

Continua...

Barra	Potência Ativa Demanda (kW)	Potência Reativa Demanda (KVAr)	S (kVA)
43	0	0	-
44	30	20	-
45	800	700	-
46	200	150	-
47	0	0	-
48	0	0	-
49	0	0	-
50	200	160	-
51	800	600	-
52	500	300	-
53	500	350	-
54	500	300	-
55	200	80	-
56	0	0	-
57	30	20	-
58	600	420	-
59	0	0	-
60	20	10	-
61	20	10	-
62	200	130	-
63	300	240	-
64	300	200	-
65	0	0	-
66	50	30	-
67	0	0	-
68	400	360	-
69	0	0	-
70	0	0	-
71	2000	1500	-
72	200	150	-
73	0	0	-
74	0	0	-
75	1200	950	-
76	300	180	-
77	0	0	-
78	400	360	-
79	2000	1300	-
80	200	140	-
81	500	360	-
82	100	30	-
83	400	360	-

Fonte: (CHIOU et al., 2005)

Tabela D6 – Dados dos circuitos do sistema de 84 barras.

Circuito	De	Para	Resistência do circuito (Ω)	Reatância do circuito (Ω)
1	0	1	0,1944	0,6624
2	1	2	0,2096	0,4304
3	2	3	0,2358	0,4842
4	3	4	0,0917	0,1883
5	4	5	0,2096	0,4304
6	5	6	0,0393	0,0807
7	6	7	0,0405	0,1380
8	7	8	0,1048	0,2152
9	7	9	0,2358	0,4842
10	7	10	0,1048	0,2152
11	0	11	0,0786	0,1614
12	11	12	0,3406	0,6944
13	12	13	0,0262	0,0538
14	12	14	0,0786	0,1614
15	0	15	0,1134	0,3864
16	15	16	0,0524	0,1076
17	16	17	0,0524	0,1076
18	17	18	0,1572	0,3228
19	18	19	0,0393	0,0807
20	19	20	0,1703	0,3497
21	20	21	0,2358	0,4842
22	21	22	0,1572	0,3228
23	21	23	0,1965	0,4035
24	23	24	0,1310	0,2690
25	0	25	0,0567	0,1932
26	25	26	0,1048	0,2152
27	26	27	0,2489	0,5111
28	27	28	0,0486	0,1656
29	28	29	0,1310	0,2690
30	0	30	0,1965	0,3960
31	30	31	0,1310	0,2690
32	31	32	0,1310	0,2690
33	32	33	0,0262	0,0538
34	33	34	0,1703	0,3497
35	34	35	0,0524	0,1076
36	35	36	0,4978	10,222
37	36	37	0,0393	0,0807
38	37	38	0,0393	0,0807
39	38	39	0,0786	0,1614
40	39	40	0,2096	0,4304
41	38	41	0,1965	0,4035
42	41	42	0,2096	0,4304

Continua...

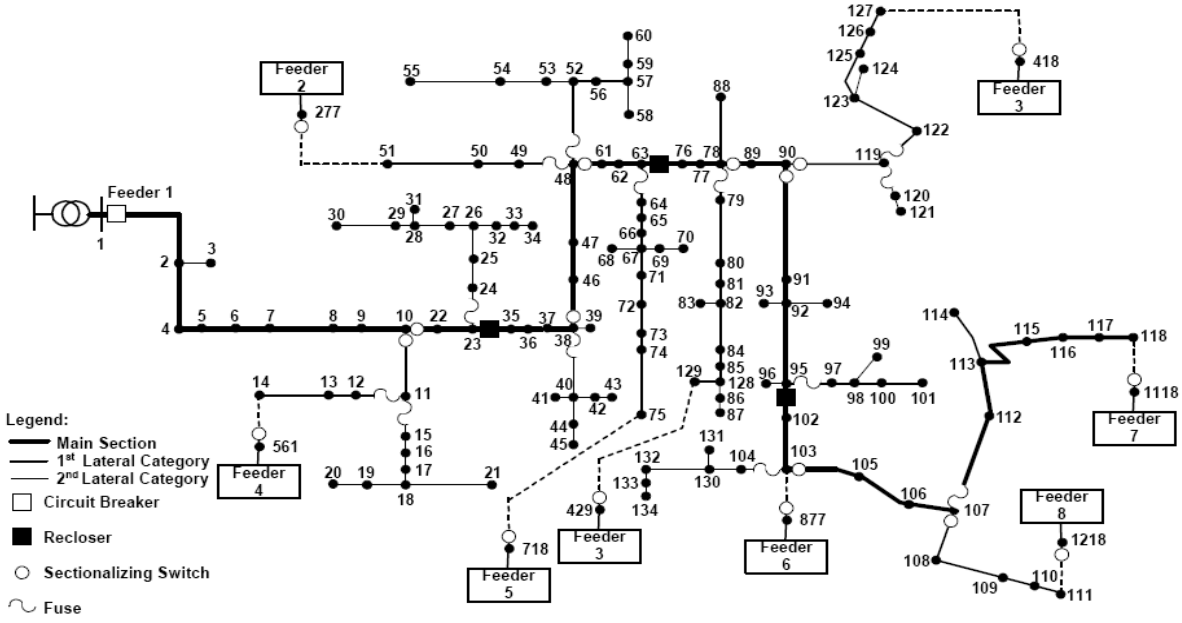
Circuito	De	Para	Resistência do circuito (Ω)	Reatância do circuito (Ω)
43	0	43	0,0486	0,1656
44	43	44	0,0393	0,0807
45	44	45	0,1310	0,2690
46	45	46	0,2358	0,4842
47	0	47	0,2430	0,8280
48	47	48	0,0655	0,1345
49	48	49	0,0655	0,1345
50	49	50	0,0393	0,0807
51	50	51	0,0786	0,1614
52	51	52	0,0393	0,0807
53	52	53	0,0786	0,1614
54	53	54	0,0524	0,1076
55	54	55	0,1310	0,2690
56	0	56	0,2268	0,7728
57	56	57	0,5371	11,029
58	57	58	0,0524	0,1076
59	58	59	0,0405	0,1380
60	59	60	0,0393	0,0807
61	60	61	0,0262	0,0538
62	61	62	0,1048	0,2152
63	62	63	0,2358	0,4842
64	63	64	0,0243	0,0828
65	0	65	0,0486	0,1656
66	65	66	0,1703	0,3497
67	66	67	0,1215	0,4140
68	67	68	0,2187	0,7452
69	68	69	0,0486	0,1656
70	69	70	0,0729	0,2484
71	70	71	0,0567	0,1932
72	71	72	0,0262	0,0528
73	0	73	0,3240	1,1040
74	73	74	0,0324	0,1104
75	74	75	0,0567	0,1932
76	75	76	0,0486	0,1656
77	0	77	0,2511	0,8556
78	77	78	0,1296	0,4416
79	78	79	0,0486	0,1656
80	79	80	0,1310	0,2640
81	80	81	0,1310	0,2640
82	81	82	0,0917	0,1883
83	82	83	0,3144	0,6456

Fonte: (CHIOU et al., 2005)

D.4 Sistema de 134 barras

O sistema de 134 barras é um sistema real trifásico, aéreo e radial que possui 134 barras de carga, 1 subestação e 133 circuitos, tem como tensão base 13,8 kV. Na figura D4 apresenta-se o diagrama unifilar do alimentador real de distribuição de energia elétrica (LAPSEE, 2011).

Figura D4 – Alimentador de energia elétrica de 84 barras.



Fonte: (LAPSEE, 2011).

A tabela D7 fornece a barra inicial e final de cada trecho, o comprimento destes trechos, a bitola do condutor e a carga conectada à barra final de cada trecho do alimentador. O fator de potência das cargas é de 0,92.

Tabela D7 – Dados do sistema de 134 barras.

Barra		Linha		Carga Conectada à Barra Final
Inicial	Final	Comprimento (m)	Bitola	Potência Aparente (kVA)
1	2	900	#4/0	0,00
2	3	50	#2	45,00
2	4	100	#4/0	0,00
4	5	40	#4/0	75,00
5	6	200	#4/0	75,00
6	7	200	#4/0	112,50
7	8	200	#4/0	75,00
8	9	10	#4/0	75,00
9	10	50	#4/0	0,00

Continua...

Barra		Linha		Carga Conectada à Barra Final
Inicial	Final	Comprimento (m)	Bitola	Potência Aparente (kVA)
10	11	100	#4	0,00
11	12	60	#4	8,60
12	13	30	#4	75,00
13	14	160	#4	75,00
11	15	30	#4	112,50
15	16	10	#4	45,00
16	17	20	#4	112,50
17	18	40	#4	0,00
18	19	40	#2	75,00
19	20	50	#2	112,50
18	21	150	#2	112,50
10	22	30	#4/0	112,50
22	23	70	#4/0	0,00
23	24	50	#4	3,00
24	25	20	#4	45,00
25	26	30	#4	0,00
26	27	60	#2	112,50
27	28	40	#2	0,00
28	29	20	#2	75,00
29	30	120	#2	112,50
28	31	20	#2	112,50
26	32	20	#4	112,50
32	33	5	#4	112,50
33	34	25	#4	112,50
23	35	10	#4/0	0,00
35	36	70	#4/0	12,40
36	37	10	#4/0	112,50
37	38	10	#4/0	0,00
38	39	70	#4/0	3,00
38	40	100	#4/0	0,00
40	41	60	#4	75,00
40	42	50	#4	75,00
42	43	10	#4	75,00
40	44	30	#4/0	112,50
44	45	40	#4/0	45
38	46	60	#4/0	1,00
46	47	20	#4/0	112,50
47	48	120	#4/0	0,00
48	49	50	#4/0	112,50
49	50	20	#4/0	75,00
50	51	170	#4/0	112,50
48	52	100	#4/0	0,00
52	53	60	#4	1,20
53	54	30	#4	112,50
54	55	130	#4	75,00
52	56	20	#4	75,00
56	57	80	#4	0,00

Continua...

Barra		Linha		Carga Conectada à Barra Final
Inicial	Final	Comprimento (m)	Bitola	Potência Aparente (kVA)
57	58	50	#2	10,00
57	59	60	#2	112,50
59	60	20	#2	3,80
48	61	40	#4/0	3,00
61	62	10	#4/0	5,50
62	63	50	#4/0	0,00
63	64	30	#1/0	75,00
64	65	20	#1/0	75,00
65	66	30	#1/0	3,50
66	67	20	#1/0	0,00
67	68	30	#4	112,50
67	69	20	#4	7,00
69	70	20	#4	112,50
67	71	50	#1/0	75,00
71	72	40	#1/0	8,50
72	73	40	#1/0	1,90
73	74	20	#1/0	112,50
74	75	110	#1/0	112,50
63	76	20	#4/0	112,50
76	77	30	#4/0	5,90
77	78	50	#4/0	0,00
78	79	70	#4/0	75,00
79	80	70	#4/0	112,50
80	81	30	#4/0	112,50
81	82	30	#4/0	0,00
82	83	50	#4	75,00
82	84	50	#4/0	75,00
84	85	30	#4/0	112,50
85	128	20	#4/0	0,00
128	86	30	#4/0	15,50
86	87	20	#4/0	75,00
78	88	130	#2	75,00
78	89	50	#4/0	75,00
89	90	50	#4/0	0,00
90	91	180	#4/0	45,00
91	92	20	#4/0	0,00
92	93	30	#2	112,50
92	94	70	#2	23,50
92	95	100	#4/0	0,00
95	96	40	#2	75,00
95	97	50	#2	6,00
97	98	60	#2	0,00
98	99	110	#4	23,50
98	100	40	#2	75,00
100	101	110	#2	112,50
95	102	60	#4/0	112,50
102	103	40	#4/0	0,00

Continua...

Barra		Linha		Carga Conectada à Barra Final
Inicial	Final	Comprimento (m)	Bitola	Potência Aparente (kVA)
103	104	30	#1/0	75,00
103	105	150	#1/0	75,00
105	106	210	#1/0	108,50
106	107	30	#1/0	0,00
107	108	100	#1/0	0,00
108	109	100	#4	108,50
109	110	30	#4	112,50
110	111	20	#4	112,50
107	112	170	#4/0	75,00
112	113	110	#4/0	0,00
113	114	110	#4	0,00
113	115	200	#4	30,00
115	116	200	#4	30,00
116	117	200	#4	30,00
117	118	200	#4	30,00
90	119	110	#2	0,00
119	120	70	#4	0,00
120	121	70	#4/0	30,00
119	122	70	#2	55,00
122	123	130	#4	0,00
123	124	20	#4	15,50
123	125	20	#4	15,50
125	126	40	#4	45,00
126	127	40	#4	112,50
128	129	60	#2	45,00
104	130	70	#1/0	0,00
130	131	20	#4/0	112,50
130	132	100	#1/0	0,00
132	133	40	#1/0	112,50
133	134	40	#1/0	112,50

Fonte: (LAPSEE, 2011)

A seguir são apresentadas as matrizes de impedâncias de cada um dos trechos.

- Trecho 0–1. A matriz de impedância deste trecho corresponde às impedâncias de geração, transmissão e do transformador da subestação:

$$[\boldsymbol{Z_{0-1}}] = \begin{bmatrix} \mathbf{0,2900 + j1,9200} & \mathbf{0,1960 + j0,5300} & \mathbf{0,1960 + j0,5300} \\ \mathbf{0,1960 + j0,5300} & \mathbf{0,2900 + j1,9200} & \mathbf{0,1960 + j0,5300} \\ \mathbf{0,1960 + j0,5300} & \mathbf{0,1960 + j0,5300} & \mathbf{0,2900 + j1,9200} \end{bmatrix} [\boldsymbol{\Omega}] \quad (18)$$

- Trecho com condutor de bitola #2:

$$[\boldsymbol{Z_{\#2}}] = \begin{bmatrix} \mathbf{1,0840 + j0,9980} & \mathbf{0,0600 + j0,4780} & \mathbf{0,0600 + j0,4500} \\ \mathbf{0,0600 + j0,4780} & \mathbf{1,0840 + j0,9980} & \mathbf{0,0600 + j0,5360} \\ \mathbf{0,0600 + j0,4500} & \mathbf{0,0600 + j0,5360} & \mathbf{1,0840 + j0,9980} \end{bmatrix} [\boldsymbol{\Omega/km}] \quad (19)$$

- Trecho com condutor de bitola #4:

$$[\boldsymbol{Z_{\#4}}] = \begin{bmatrix} \mathbf{1,6440 + j1,0060} & \mathbf{0,0600 + j0,4780} & \mathbf{0,0600 + j0,4500} \\ \mathbf{0,0600 + j0,4780} & \mathbf{1,6440 + j1,0060} & \mathbf{0,0600 + j0,5360} \\ \mathbf{0,0600 + j0,4500} & \mathbf{0,0600 + j0,5360} & \mathbf{1,6440 + j1,0060} \end{bmatrix} [\boldsymbol{\Omega/km}] \quad (20)$$

- Trecho com condutor de bitola #1/0:

$$[\boldsymbol{Z_{\#1/0}}] = \begin{bmatrix} \mathbf{0,7567 + j1,0067} & \mathbf{0,0600 + j0,4780} & \mathbf{0,0600 + j0,4500} \\ \mathbf{0,0600 + j0,4780} & \mathbf{0,7567 + j1,0067} & \mathbf{0,0600 + j0,5360} \\ \mathbf{0,0600 + j0,4500} & \mathbf{0,0600 + j0,5360} & \mathbf{0,7567 + j1,0067} \end{bmatrix} [\boldsymbol{\Omega/km}] \quad (21)$$

- Trecho com condutor de bitola #4/0:

$$[\boldsymbol{Z_{\#4/0}}] = \begin{bmatrix} \mathbf{0,4272 + j0,9609} & \mathbf{0,0600 + j0,4780} & \mathbf{0,0600 + j0,4500} \\ \mathbf{0,0600 + j0,4780} & \mathbf{0,4272 + j0,9609} & \mathbf{0,0600 + j0,5360} \\ \mathbf{0,0600 + j0,4500} & \mathbf{0,0600 + j0,5360} & \mathbf{0,4272 + j0,9609} \end{bmatrix} [\boldsymbol{\Omega/km}] \quad (22)$$

ANEXO E – RESULTADOS DO TESTE DE REFERÊNCIA CRUZADA

Neste anexo encontram-se os resultados obtidos pelo método proposto para todos as vezes que foram executados o programa no teste de referência cruzada, juntamente com o acerto médio e o desvio padrão.

E.1 Teste I – Desvio $\mathcal{E}$ = 3%

Tabela E1 – Resultados para o desvio de 3% - sistema de 5 barras.

	Sistema de 5 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
2	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
3	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
4	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
5	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
6	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
7	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
8	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
9	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
10	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
11	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
12	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
13	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
14	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
15	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
16	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
17	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
18	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
19	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
20	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
Acerto médio	**100,00**	**97,50**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**98,18**	**100,00**
Desvio Padrão	**±0,00**	**±1,40**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,82**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela E2 – Resultados para o desvio de 3% - sistema de 33 barras.

	Sistema de 33 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
2	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
3	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
4	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
5	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
6	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
7	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
8	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
9	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
10	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
11	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
12	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
13	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
14	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
15	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
16	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
17	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
18	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
19	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
20	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
Acerto médio	**100,00**	**98,47**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**98,13**	**100,00**
Desvio Padrão	**±0,00**	**±0,89**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,72**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela E3 – Resultados para o desvio de 3% - sistema de 84 barras.

	Sistema de 84 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	100,00	96,88	100,00	100,00	94,79	100,00	100,00
2	100,00	95,83	100,00	100,00	95,83	100,00	100,00
3	100,00	94,79	100,00	100,00	97,92	100,00	100,00
4	100,00	95,83	100,00	100,00	94,79	100,00	100,00
5	100,00	95,83	100,00	100,00	97,92	100,00	100,00
6	100,00	96,88	100,00	100,00	94,79	100,00	100,00
7	100,00	95,83	100,00	100,00	98,96	100,00	100,00
8	100,00	94,79	100,00	100,00	96,88	100,00	100,00
9	100,00	95,83	100,00	100,00	97,92	100,00	100,00
10	100,00	97,92	100,00	100,00	97,92	100,00	100,00
11	100,00	95,83	100,00	100,00	97,92	100,00	100,00
12	100,00	95,83	100,00	100,00	98,96	100,00	100,00
13	100,00	96,88	100,00	100,00	96,88	100,00	100,00
14	100,00	95,83	100,00	100,00	97,92	100,00	100,00
15	100,00	94,79	100,00	100,00	97,92	100,00	100,00
16	100,00	94,79	100,00	100,00	94,79	100,00	100,00
17	100,00	95,83	100,00	100,00	96,88	100,00	100,00
18	100,00	96,88	100,00	100,00	94,79	100,00	100,00
19	100,00	95,83	100,00	100,00	94,79	100,00	100,00
20	100,00	95,83	100,00	100,00	97,92	100,00	100,00
Acerto médio	**100,00**	**95,94**	**100,00**	**100,00**	**96,82**	**100,00**	**100,00**
Desvio Padrão	**±0,00**	**±0,82**	**±0,00**	**±0,00**	**±1,53**	**±0,00**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela E4 – Resultados para o desvio de 3% - sistema de 134 barras.

	Sistema de 134 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	100,00	94,44	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
2	100,00	93,06	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
3	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	94,79	100,00
4	100,00	93,06	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
5	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
6	100,00	94,44	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
7	100,00	93,06	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
8	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	94,79	100,00
9	100,00	94,44	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
10	100,00	94,44	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
11	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	94,79	100,00
12	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
13	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
14	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
15	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
16	100,00	94,44	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
17	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
18	100,00	94,44	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
19	100,00	93,06	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
20	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	94,79	100,00
Acerto médio	**100,00**	**95,00**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**97,34**	**100,00**
Desvio Padrão	**±0,00**	**±1,31**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±1,45**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

E.2 Teste I – Desvio $\mathcal{E}$ = 5%

Tabela E5 – Resultados para o desvio de 5% - sistema de 5 barras.

	Sistema de 5 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
2	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
3	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
4	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
5	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
6	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
7	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
8	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
9	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
10	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
11	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
12	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
13	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
14	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
15	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
16	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
17	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
18	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
19	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
20	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
Acerto médio	**100,00**	**97,36**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**98,07**	**100,00**
Desvio Padrão	**±0,00**	**±1,09**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±1,03**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela E6 – Resultados para o desvio de 5% - sistema de 33 barras.

	Sistema de 33 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	95,83	100,00
2	100,00	94,44	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
3	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	95,83	100,00
4	100,00	93,06	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
5	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
6	100,00	94,44	100,00	100,00	100,00	95,83	100,00
7	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
8	100,00	93,06	100,00	100,00	100,00	95,83	100,00
9	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
10	100,00	94,44	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
11	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
12	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
13	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
14	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
15	100,00	94,44	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
16	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
17	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
18	100,00	94,44	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
19	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
20	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
Acerto médio	**100,00**	**95,56**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**96,98**	**100,00**
Desvio Padrão	**±0,00**	**±1,32**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,75**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela E7 – Resultados para o desvio de 5% - sistema de 84 barras.

	Sistema de 84 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	100,00	97,22	100,00	100,00	94,79	100,00	100,00
2	100,00	98,61	100,00	100,00	95,83	100,00	100,00
3	100,00	97,22	100,00	100,00	94,79	100,00	100,00
4	100,00	98,61	100,00	100,00	96,88	100,00	100,00
5	100,00	95,83	100,00	100,00	95,83	100,00	100,00
6	100,00	97,22	100,00	100,00	96,88	100,00	100,00
7	100,00	98,61	100,00	100,00	95,83	100,00	100,00
8	100,00	97,22	100,00	100,00	95,83	100,00	100,00
9	100,00	95,83	100,00	100,00	94,79	100,00	100,00
10	100,00	98,61	100,00	100,00	95,83	100,00	100,00
11	100,00	97,22	100,00	100,00	94,79	100,00	100,00
12	100,00	97,22	100,00	100,00	96,88	100,00	100,00
13	100,00	97,22	100,00	100,00	95,83	100,00	100,00
14	100,00	95,83	100,00	100,00	96,88	100,00	100,00
15	100,00	95,83	100,00	100,00	94,79	100,00	100,00
16	100,00	97,22	100,00	100,00	95,83	100,00	100,00
17	100,00	97,22	100,00	100,00	96,88	100,00	100,00
18	100,00	95,83	100,00	100,00	95,83	100,00	100,00
19	100,00	95,83	100,00	100,00	95,83	100,00	100,00
20	100,00	98,61	100,00	100,00	94,79	100,00	100,00
Acerto médio	**100,00**	**97,15**	**100,00**	**100,00**	**95,78**	**100,00**	**100,00**
Desvio Padrão	**±0,00**	**±1,05**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,79**	**±0,00**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela E8 – Resultados para o desvio de 5% - sistema de 134 barras.

	Sistema de 134 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	100,00	91,67	100,00	100,00	100,00	92,71	100,00
2	100,00	93,06	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
3	100,00	94,44	100,00	100,00	100,00	91,67	100,00
4	100,00	94,44	100,00	100,00	100,00	91,67	100,00
5	100,00	93,06	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
6	100,00	94,44	100,00	100,00	100,00	92,71	100,00
7	100,00	93,06	100,00	100,00	100,00	91,67	100,00
8	100,00	94,44	100,00	100,00	100,00	91,67	100,00
9	100,00	93,06	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
10	100,00	91,67	100,00	100,00	100,00	92,71	100,00
11	100,00	93,06	100,00	100,00	100,00	91,67	100,00
12	100,00	93,06	100,00	100,00	100,00	91,67	100,00
13	100,00	94,44	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
14	100,00	93,06	100,00	100,00	100,00	91,67	100,00
15	100,00	93,06	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
16	100,00	94,44	100,00	100,00	100,00	92,71	100,00
17	100,00	93,06	100,00	100,00	100,00	91,67	100,00
18	100,00	90,28	100,00	100,00	100,00	91,67	100,00
19	100,00	93,06	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
20	100,00	91,67	100,00	100,00	100,00	91,67	100,00
Acerto médio	**100,00**	**93,13**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**91,56**	**100,00**
Desvio Padrão	**±0,00**	**±1,15**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,75**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

E.3 Teste II – Conjunto de detectores A

Tabela E9 – Resultados para o conjunto de detectores A - sistema de 5 barras.

	Sistema de 5 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	98,61	95,83	100,00	100,00	58,33	61,46	100,00
2	97,22	96,88	100,00	100,00	57,29	63,54	100,00
3	97,22	95,83	95,83	100,00	59,38	60,42	100,00
4	98,61	96,88	97,92	100,00	57,29	61,46	100,00
5	97,22	95,83	100,00	100,00	58,33	62,50	100,00
6	95,83	94,79	100,00	100,00	58,33	61,46	100,00
7	97,22	96,88	97,92	100,00	58,33	62,50	100,00
8	98,61	95,83	100,00	100,00	57,29	63,54	100,00
9	95,83	95,83	97,92	100,00	59,38	62,50	100,00
10	97,22	95,83	100,00	100,00	57,29	61,46	100,00
11	95,83	94,79	100,00	100,00	58,33	61,46	100,00
12	98,61	95,83	97,92	100,00	59,38	62,50	100,00
13	97,22	94,79	100,00	100,00	58,33	61,46	100,00
14	97,22	95,83	95,83	100,00	57,29	63,54	100,00
15	97,22	94,79	97,92	100,00	58,33	62,50	100,00
16	98,61	94,79	100,00	100,00	59,38	62,50	100,00
17	97,22	95,83	100,00	100,00	58,33	60,42	100,00
18	97,22	95,83	95,83	100,00	58,33	61,46	100,00
19	95,83	95,83	100,00	100,00	57,29	62,50	100,00
20	97,22	94,79	95,83	100,00	58,33	63,54	100,00
Acerto médio	**97,29**	**95,68**	**98,65**	**100,00**	**58,23**	**62,14**	**100,00**
Desvio Padrão	**±0,95**	**±0,70**	**±1,69**	**±0,00**	**±0,75**	**±0,97**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela E10 – Resultados para o conjunto de detectores A - sistema de 33 barras.

	Sistema de 33 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	93,75	94,79	100,00	100,00	72,92	66,67	100,00
2	95,83	93,75	100,00	100,00	71,88	66,67	100,00
3	94,79	94,79	97,92	99,31	72,92	66,67	100,00
4	94,79	93,75	97,92	100,00	73,96	67,71	100,00
5	95,83	93,75	100,00	98,61	73,96	67,71	100,00
6	94,79	94,79	97,92	99,31	72,92	65,63	100,00
7	93,75	92,71	100,00	100,00	71,88	66,67	100,00
8	95,83	94,79	97,92	99,31	72,92	65,63	100,00
9	94,79	94,79	100,00	100,00	73,96	67,71	100,00
10	95,83	94,79	97,92	99,31	73,96	65,63	100,00
11	94,79	93,75	97,92	100,00	72,92	66,67	100,00
12	93,75	94,79	100,00	98,61	71,88	66,67	100,00
13	95,83	93,75	97,92	99,31	73,96	65,63	100,00
14	93,75	94,79	100,00	100,00	72,92	65,63	100,00
15	95,83	92,71	97,92	100,00	72,92	66,67	100,00
16	94,79	94,79	100,00	100,00	72,92	66,67	100,00
17	95,83	94,79	100,00	99,31	71,88	65,63	100,00
18	95,83	93,75	97,92	100,00	73,96	66,67	100,00
19	94,79	94,79	100,00	100,00	72,92	67,71	100,00
20	93,75	93,75	100,00	98,61	71,88	65,63	100,00
Acerto médio	**94,95**	**94,22**	**99,06**	**99,58**	**72,97**	**66,51**	**100,00**
Desvio Padrão	**±0,85**	**±0,71**	**±1,06**	**±0,52**	**±0,79**	**±0,78**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela E 11 – Resultados para o conjunto de detectores A - sistema de 84 barras.

	Sistema de 84 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	94,79	82,29	100,00	99,31	79,17	71,88	100,00
2	93,75	83,33	100,00	98,61	78,13	72,92	100,00
3	94,79	83,33	100,00	98,61	78,13	71,88	100,00
4	93,75	83,33	100,00	98,61	77,08	71,88	100,00
5	94,79	82,29	100,00	98,61	79,17	71,88	100,00
6	95,83	83,33	100,00	98,61	77,08	71,88	100,00
7	94,79	82,29	100,00	100,00	78,13	72,92	100,00
8	93,75	84,38	100,00	98,61	78,13	72,92	100,00
9	94,79	83,33	100,00	98,61	78,13	72,92	100,00
10	93,75	82,29	100,00	98,61	79,17	71,88	100,00
11	95,83	83,33	100,00	100,00	78,13	70,83	100,00
12	94,79	84,38	100,00	99,31	77,08	72,92	100,00
13	94,79	83,33	100,00	98,61	79,17	71,88	100,00
14	94,79	82,29	100,00	98,61	78,13	72,92	100,00
15	93,75	83,33	100,00	99,31	78,13	72,92	100,00
16	94,79	84,38	100,00	100,00	79,17	71,88	100,00
17	93,75	82,29	100,00	98,61	78,13	70,83	100,00
18	93,75	84,38	100,00	98,61	79,17	71,88	100,00
19	94,79	83,33	100,00	98,61	78,13	70,83	100,00
20	93,75	82,29	100,00	99,31	78,13	71,88	100,00
Acerto médio	**94,48**	**83,18**	**100,00**	**98,96**	**78,28**	**98,07**	**100,00**
Desvio Padrão	**±0,68**	**±0,78**	**±0,00**	**±0,53**	**±0,70**	**±1,03**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela E12 – Resultados para o conjunto de detectores A - sistema de 134 barras.

	Sistema de 134 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	93,75	93,75	100,00	100,00	67,71	75,00	100,00
2	92,71	94,79	100,00	100,00	66,67	75,00	100,00
3	93,75	93,75	97,92	100,00	65,63	73,96	100,00
4	92,71	94,79	100,00	100,00	67,71	76,04	100,00
5	92,71	93,75	100,00	100,00	66,67	75,00	100,00
6	93,75	95,83	100,00	100,00	65,63	73,96	100,00
7	92,71	94,79	97,92	100,00	67,71	73,96	100,00
8	92,71	93,75	100,00	100,00	65,63	72,92	100,00
9	92,71	93,75	100,00	100,00	66,67	73,96	100,00
10	93,75	93,75	100,00	100,00	66,67	75,00	100,00
11	92,71	93,75	97,92	100,00	67,71	73,96	100,00
12	94,79	94,79	100,00	100,00	67,71	73,96	100,00
13	92,71	95,83	100,00	100,00	66,67	76,04	100,00
14	92,71	93,75	97,92	100,00	65,63	73,96	100,00
15	93,75	94,79	100,00	100,00	67,71	73,96	100,00
16	92,71	93,75	100,00	100,00	66,67	76,04	100,00
17	94,79	93,75	97,92	100,00	65,63	73,96	100,00
18	93,75	94,79	100,00	100,00	67,71	76,04	100,00
19	93,75	95,83	100,00	100,00	66,67	73,96	100,00
20	92,71	93,75	100,00	100,00	66,67	75,00	100,00
Acerto médio	**93,28**	**94,38**	**99,48**	**100,00**	**66,77**	**74,58**	**100,00**
Desvio Padrão	**±0,71**	**±0,79**	**±0,93**	**±0,00**	**±0,82**	**±0,92**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

E.4 Teste II – Conjunto de detectores B

Tabela E13 – Resultados para o conjunto de detectores B - sistema de 5 barras.

	Sistema de 5 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	95,83	93,06	100,00	100,00	78,13	77,08	100,00
2	97,22	94,44	100,00	100,00	77,08	77,08	100,00
3	95,83	93,06	100,00	100,00	78,13	77,08	100,00
4	97,22	94,44	100,00	100,00	77,08	78,13	100,00
5	95,83	93,06	100,00	100,00	78,13	77,08	100,00
6	94,44	93,06	100,00	100,00	79,17	78,13	100,00
7	94,44	94,44	100,00	100,00	78,13	78,13	100,00
8	95,83	91,67	100,00	100,00	77,08	78,13	100,00
9	95,83	93,06	100,00	100,00	77,08	78,13	100,00
10	94,44	93,06	100,00	100,00	77,08	77,08	100,00
11	97,22	94,44	100,00	100,00	79,17	78,13	100,00
12	97,22	97,22	100,00	100,00	78,13	77,08	100,00
13	95,83	93,06	100,00	100,00	78,13	77,08	100,00
14	95,83	91,67	100,00	100,00	77,08	78,13	100,00
15	95,83	91,67	100,00	100,00	78,13	77,08	100,00
16	95,83	93,06	100,00	100,00	77,08	78,13	100,00
17	94,44	91,67	100,00	100,00	78,13	77,08	100,00
18	97,22	93,06	100,00	100,00	78,13	77,08	100,00
19	95,83	91,67	100,00	100,00	78,13	77,08	100,00
20	94,44	93,06	100,00	100,00	78,13	77,08	100,00
Acerto médio	**95,83**	**93,19**	**100,00**	**100,00**	**77,86**	**77,50**	**100,00**
Desvio Padrão	**±1,01**	**±1,34**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,67**	**±0,52**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela E14 – Resultados para o conjunto de detectores B - sistema de 33 barras.

	Sistema de 33 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	91,67	95,83	100,00	100,00	83,33	76,04	100,00
2	90,28	95,83	100,00	100,00	82,29	73,96	100,00
3	91,67	95,83	100,00	100,00	82,29	75,00	100,00
4	90,28	95,83	100,00	100,00	82,29	73,96	100,00
5	91,67	97,22	100,00	100,00	83,33	76,04	100,00
6	90,28	95,83	100,00	100,00	83,33	75,00	100,00
7	91,67	97,22	97,92	100,00	82,29	76,04	100,00
8	91,67	95,83	100,00	100,00	83,33	76,04	100,00
9	91,67	94,44	100,00	100,00	83,33	76,04	100,00
10	90,28	95,83	97,92	100,00	81,25	75,00	100,00
11	91,67	97,22	97,92	100,00	82,29	76,04	100,00
12	90,28	94,44	100,00	100,00	84,38	73,96	100,00
13	91,67	95,83	100,00	100,00	84,38	76,04	100,00
14	90,28	94,44	100,00	100,00	82,29	75,00	100,00
15	90,28	94,44	100,00	100,00	83,33	76,04	100,00
16	91,67	95,83	100,00	100,00	82,29	76,04	100,00
17	90,28	94,44	100,00	100,00	83,33	75,00	100,00
18	90,28	95,83	100,00	100,00	82,29	76,04	100,00
19	90,28	95,83	100,00	100,00	83,33	73,96	100,00
20	90,28	94,44	100,00	100,00	81,25	76,04	100,00
Acerto médio	**90,90**	**95,63**	**99,69**	**100,00**	**82,81**	**75,36**	**100,00**
Desvio Padrão	**±0,71**	**±0,93**	**±0,76**	**±0,00**	**±0,86**	**±0,85**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela E15 – Resultados para o conjunto de detectores B - sistema de 84 barras.

	Sistema de 84 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	94,44	93,06	100,00	100,00	79,17	78,13	100,00
2	94,44	93,06	100,00	100,00	79,17	76,04	100,00
3	94,44	91,67	100,00	100,00	77,08	78,13	100,00
4	95,83	93,06	100,00	100,00	79,17	76,04	100,00
5	94,44	93,06	100,00	100,00	79,17	78,13	100,00
6	95,83	91,67	100,00	100,00	79,17	76,04	100,00
7	94,44	93,06	100,00	100,00	79,17	78,13	100,00
8	94,44	93,06	100,00	100,00	77,08	76,04	100,00
9	95,83	93,06	100,00	100,00	80,21	78,13	100,00
10	95,83	91,67	100,00	100,00	79,17	77,08	100,00
11	94,44	93,06	100,00	100,00	79,17	78,13	100,00
12	97,22	91,67	100,00	100,00	80,21	77,08	100,00
13	95,83	93,06	100,00	100,00	80,21	77,08	100,00
14	94,44	91,67	100,00	100,00	79,17	77,08	100,00
15	94,44	93,06	100,00	100,00	79,17	78,13	100,00
16	95,83	93,06	100,00	100,00	77,08	76,04	100,00
17	94,44	93,06	100,00	100,00	79,17	76,04	100,00
18	95,83	93,06	100,00	100,00	79,17	78,13	100,00
19	94,44	93,06	100,00	100,00	79,17	76,04	100,00
20	95,83	93,06	100,00	100,00	80,21	78,13	100,00
Acerto médio	**95,14**	**92,71**	**100,00**	**100,00**	**79,06**	**77,19**	**100,00**
Desvio Padrão	**±0,84**	**±0,62**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,95**	**±0,95**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela E16 – Resultados para o conjunto de detectores B - sistema de 134 barras.

	Sistema de 134 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	95,83	98,61	100,00	100,00	76,04	78,13	100,00
2	94,44	97,22	100,00	100,00	75,00	78,13	100,00
3	95,83	100,00	100,00	100,00	76,04	79,17	100,00
4	94,44	97,22	100,00	100,00	75,00	78,13	100,00
5	97,22	97,22	100,00	100,00	76,04	78,13	100,00
6	95,83	100,00	100,00	100,00	78,13	78,13	100,00
7	95,83	98,61	100,00	100,00	75,00	79,17	100,00
8	94,44	97,22	100,00	100,00	76,04	78,13	100,00
9	97,22	100,00	100,00	100,00	75,00	79,17	100,00
10	95,83	98,61	100,00	100,00	76,04	78,13	100,00
11	95,83	98,61	100,00	100,00	76,04	78,13	100,00
12	95,83	100,00	100,00	100,00	76,04	79,17	100,00
13	94,44	98,61	100,00	100,00	76,04	78,13	100,00
14	97,22	98,61	100,00	100,00	76,04	79,17	100,00
15	95,83	100,00	100,00	100,00	78,13	79,17	100,00
16	94,44	98,61	100,00	100,00	76,04	78,13	100,00
17	95,83	100,00	100,00	100,00	75,00	79,17	100,00
18	97,22	100,00	100,00	100,00	76,04	78,13	100,00
19	95,83	98,61	100,00	100,00	76,04	78,13	100,00
20	95,83	100,00	100,00	100,00	78,13	78,13	100,00
Acerto médio	**95,76**	**98,99**	**100,00**	**100,00**	**76,09**	**78,49**	**100,00**
Desvio Padrão	**±0,95**	**±1,07**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,98**	**±0,51**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

E.5 Teste II – Conjunto de detectores C

Tabela E17 – Resultados para o conjunto de detectores C - sistema de 5 barras.

	Sistema de 5 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	97,22	95,83	100,00	100,00	85,42	85,42	100,00
2	100,00	95,83	100,00	100,00	84,38	85,42	100,00
3	97,22	94,44	100,00	100,00	84,38	86,46	100,00
4	100,00	95,83	100,00	100,00	85,42	86,46	100,00
5	95,83	97,22	100,00	100,00	84,38	85,42	100,00
6	97,22	94,44	100,00	100,00	85,42	86,46	100,00
7	95,83	95,83	100,00	100,00	84,38	85,42	100,00
8	95,83	95,83	100,00	100,00	85,42	86,46	100,00
9	97,22	95,83	100,00	100,00	84,38	86,46	100,00
10	95,83	95,83	100,00	100,00	84,38	85,42	100,00
11	97,22	97,22	100,00	100,00	84,38	86,46	100,00
12	100,00	95,83	100,00	100,00	84,38	86,46	100,00
13	97,22	97,22	100,00	100,00	84,38	85,42	100,00
14	95,83	95,83	100,00	100,00	85,42	85,42	100,00
15	97,22	95,83	100,00	100,00	84,38	85,42	100,00
16	95,83	95,83	100,00	100,00	84,38	85,42	100,00
17	97,22	95,83	100,00	100,00	84,38	84,38	100,00
18	95,83	97,22	100,00	100,00	84,38	85,42	100,00
19	97,22	95,83	100,00	100,00	84,38	86,46	100,00
20	97,22	95,83	100,00	100,00	84,38	85,42	100,00
Acerto médio	**97,15**	**95,97**	**100,00**	**100,00**	**84,64**	**85,78**	**100,00**
Desvio Padrão	**±1,39**	**±0,77**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,46**	**±0,61**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela E18 – Resultados para o conjunto de detectores C - sistema de 33 barras.

	Sistema de 33 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	98,61	94,44	100,00	100,00	87,50	85,42	100,00
2	98,61	94,44	100,00	100,00	87,50	86,46	100,00
3	97,22	94,44	100,00	100,00	88,54	85,42	100,00
4	98,61	95,83	100,00	100,00	88,54	86,46	100,00
5	100,00	93,06	100,00	100,00	87,50	85,42	100,00
6	98,61	94,44	100,00	100,00	88,54	87,50	100,00
7	97,22	93,06	100,00	100,00	88,54	87,50	100,00
8	97,22	95,83	100,00	100,00	87,50	86,46	100,00
9	100,00	94,44	100,00	100,00	87,50	86,46	100,00
10	98,61	94,44	100,00	100,00	88,54	86,46	100,00
11	97,22	94,44	100,00	100,00	87,50	87,50	100,00
12	98,61	94,44	100,00	100,00	87,50	87,50	100,00
13	100,00	94,44	100,00	100,00	87,50	86,46	100,00
14	98,61	95,83	100,00	100,00	87,50	86,46	100,00
15	100,00	93,06	100,00	100,00	87,50	86,46	100,00
16	98,61	94,44	100,00	100,00	87,50	86,46	100,00
17	98,61	93,06	100,00	100,00	87,50	87,50	100,00
18	98,61	94,44	100,00	100,00	88,54	87,50	100,00
19	98,61	94,44	100,00	100,00	87,50	86,46	100,00
20	97,22	94,44	100,00	100,00	87,50	86,46	100,00
Acerto médio	**98,54**	**94,38**	**100,00**	**100,00**	**87,81**	**86,61**	**100,00**
Desvio Padrão	**±0,95**	**±0,84**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,49**	**±0,70**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela E19 – Resultados para o conjunto de detectores C - sistema de 84 barras.

	Sistema de 84 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	95,83	98,61	100,00	100,00	82,29	84,38	100,00
2	95,83	98,61	100,00	100,00	83,33	84,38	100,00
3	97,22	98,61	100,00	100,00	82,29	84,38	100,00
4	94,44	98,61	100,00	100,00	83,33	84,38	100,00
5	97,22	98,61	100,00	100,00	83,33	84,38	100,00
6	100,00	98,61	100,00	100,00	83,33	84,38	100,00
7	95,83	98,61	100,00	100,00	83,33	85,42	100,00
8	97,22	98,61	100,00	100,00	83,33	84,38	100,00
9	94,44	100,00	100,00	100,00	83,33	84,38	100,00
10	95,83	98,61	100,00	100,00	83,33	85,42	100,00
11	95,83	98,61	100,00	100,00	83,33	85,42	100,00
12	97,22	100,00	100,00	100,00	83,33	85,42	100,00
13	95,83	98,61	100,00	100,00	84,38	84,38	100,00
14	95,83	98,61	100,00	100,00	84,38	84,38	100,00
15	95,83	98,61	100,00	100,00	83,33	84,38	100,00
16	95,83	98,61	100,00	100,00	83,33	85,42	100,00
17	95,83	98,61	100,00	100,00	83,33	85,42	100,00
18	94,44	98,61	100,00	100,00	84,38	84,38	100,00
19	95,83	98,61	100,00	100,00	84,38	84,38	100,00
20	95,83	98,61	100,00	100,00	83,33	84,38	100,00
Acerto médio	**96,11**	**98,75**	**100,00**	**100,00**	**83,44**	**84,69**	**100,00**
Desvio Padrão	**±1,24**	**±0,43**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,58**	**±0,49**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela E20 – Resultados para o conjunto de detectores C - sistema de 134 barras.

	Sistema de 134 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	100,00	97,22	100,00	100,00	87,50	81,25	100,00
2	98,61	97,22	100,00	100,00	86,46	81,25	100,00
3	97,22	98,61	100,00	100,00	87,50	81,25	100,00
4	98,61	97,22	100,00	100,00	86,46	82,29	100,00
5	97,22	97,22	100,00	100,00	86,46	80,21	100,00
6	98,61	98,61	100,00	100,00	86,46	82,29	100,00
7	97,22	97,22	100,00	100,00	86,46	81,25	100,00
8	98,61	98,61	100,00	100,00	85,42	81,25	100,00
9	98,61	97,22	100,00	100,00	85,42	82,29	100,00
10	98,61	100,00	100,00	100,00	85,42	82,29	100,00
11	100,00	97,22	100,00	100,00	86,46	82,29	100,00
12	97,22	97,22	100,00	100,00	86,46	82,29	100,00
13	98,61	97,22	100,00	100,00	86,46	82,29	100,00
14	98,61	97,22	100,00	100,00	86,46	82,29	100,00
15	97,22	97,22	100,00	100,00	85,42	82,29	100,00
16	98,61	97,22	100,00	100,00	86,46	81,25	100,00
17	98,61	98,61	100,00	100,00	86,46	81,25	100,00
18	98,61	98,61	100,00	100,00	86,46	81,25	100,00
19	98,61	98,61	100,00	100,00	85,42	82,29	100,00
20	100,00	97,22	100,00	100,00	86,46	82,29	100,00
Acerto médio	**98,47**	**97,78**	**100,00**	**100,00**	**86,30**	**81,77**	**100,00**
Desvio Padrão	**±0,89**	**±0,83**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,61**	**±0,63**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

E.6 Teste II – Conjunto de detectores D

Tabela E21 – Resultados para o conjunto de detectores D - sistema de 5 barras.

	Sistema de 5 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	92,71	100,00
2	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	91,67	100,00
3	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	92,71	100,00
4	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	92,71	100,00
5	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	92,71	100,00
6	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	91,67	100,00
7	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	92,71	100,00
8	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	91,67	100,00
9	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	92,71	100,00
10	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	91,67	100,00
11	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	91,67	100,00
12	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	91,67	100,00
13	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	91,67	100,00
14	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	92,71	100,00
15	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	91,67	100,00
16	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	92,71	100,00
17	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	91,67	100,00
18	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	91,67	100,00
19	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	91,67	100,00
20	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	91,67	100,00
Acerto médio	**100,00**	**97,78**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**92,08**	**100,00**
Desvio Padrão	**±0,00**	**±0,95**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,52**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela E22 – Resultados para o conjunto de detectores D - sistema de 33 barras.

	Sistema de 33 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	91,67	100,00
2	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
3	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
4	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
5	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
6	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
7	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
8	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
9	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
10	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
11	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	91,67	100,00
12	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
13	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
14	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
15	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
16	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
17	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
18	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
19	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	91,67	100,00
20	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	91,67	100,00
Acerto médio	**100,00**	**96,39**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**90,83**	**100,00**
Desvio Padrão	**±0,00**	**±0,70**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,43**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela E23 – Resultados para o conjunto de detectores D - sistema de 84 barras.

	Sistema de 84 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	100,00	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00	100,00
2	100,00	97,22	100,00	100,00	91,67	100,00	100,00
3	100,00	97,22	100,00	100,00	91,67	100,00	100,00
4	100,00	97,22	100,00	100,00	90,63	100,00	100,00
5	100,00	97,22	100,00	100,00	91,67	100,00	100,00
6	100,00	97,22	100,00	100,00	91,67	100,00	100,00
7	100,00	97,22	100,00	100,00	91,67	100,00	100,00
8	100,00	97,22	100,00	100,00	91,67	100,00	100,00
9	100,00	97,22	100,00	100,00	91,67	100,00	100,00
10	100,00	97,22	100,00	100,00	91,67	100,00	100,00
11	100,00	98,61	100,00	100,00	92,71	100,00	100,00
12	100,00	100,00	100,00	100,00	92,71	100,00	100,00
13	100,00	98,61	100,00	100,00	91,67	100,00	100,00
14	100,00	97,22	100,00	100,00	91,67	100,00	100,00
15	100,00	97,22	100,00	100,00	91,67	100,00	100,00
16	100,00	97,22	100,00	100,00	91,67	100,00	100,00
17	100,00	97,22	100,00	100,00	92,71	100,00	100,00
18	100,00	97,22	100,00	100,00	91,67	100,00	100,00
19	100,00	98,61	100,00	100,00	91,67	100,00	100,00
20	100,00	98,61	100,00	100,00	91,67	100,00	100,00
Acerto médio	**100,00**	**97,78**	**100,00**	**100,00**	**91,72**	**100,00**	**100,00**
Desvio Padrão	**±0,00**	**±0,95**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,53**	**±0,00**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela E24 – Resultados para o conjunto de detectores D - sistema de 134 barras.

	Sistema de 134 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	89,58	100,00
2	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
3	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
4	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
5	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
6	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
7	100,00	98,61	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
8	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
9	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
10	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
11	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	89,58	100,00
12	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	89,58	100,00
13	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
14	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
15	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
16	100,00	95,83	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
17	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
18	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
19	100,00	97,22	100,00	100,00	100,00	90,63	100,00
20	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	89,58	100,00
Acerto médio	**100,00**	**97,71**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**90,42**	**100,00**
Desvio Padrão	**±0,00**	**±1,03**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,43**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

E.7 Teste II – Conjunto de detectores E

Tabela E25 – Resultados para o conjunto de detectores E - sistema de 5 barras.

	Sistema de 5 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
3	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
4	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
5	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
6	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
7	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
8	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
9	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
10	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
11	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
12	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
13	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
14	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
15	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
16	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
17	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
18	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
19	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
20	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Acerto médio	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**98,65**	**100,00**
Desvio Padrão	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,76**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela E26 – Resultados para o conjunto de detectores E - sistema de 33 barras.

	Sistema de 33 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
2	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
3	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
4	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
5	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
6	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
7	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
8	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
9	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
10	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
11	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
12	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
13	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
14	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
15	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
16	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
17	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
18	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
19	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
20	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
Acerto médio	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**97,08**	**100,00**
Desvio Padrão	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,54**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela E27 – Resultados para o conjunto de detectores E - sistema de 84 barras.

	Sistema de 84 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00	100,00
3	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00	100,00
4	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00	100,00
5	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00	100,00
6	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00	100,00
7	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00	100,00
8	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00	100,00
9	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00	100,00
10	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00	100,00
11	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00	100,00
12	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00	100,00
13	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00	100,00
14	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
15	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00	100,00
16	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00	100,00
17	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00	100,00
18	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00	100,00
19	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00	100,00
20	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00	100,00
Acerto médio	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**98,85**	**100,00**	**100,00**
Desvio Padrão	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,58**	**±0,00**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela E28 – Resultados para o conjunto de detectores E - sistema de 134 barras.

	Sistema de 134 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
2	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
3	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
4	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
5	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
6	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
7	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
8	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
9	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
10	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
11	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
12	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
13	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
14	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
15	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
16	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
17	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
18	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
19	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
20	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
Acerto médio	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**98,02**	**100,00**
Desvio Padrão	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,58**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

E.8 Teste III – Taxa de afinidade A

Tabela E29 – Resultados para a taxa de afinidade A - sistema de 5 barras.

	Sistema de 5 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	33,33	36,11	54,17	32,64	37,50	33,33	72,92
2	33,33	37,50	54,17	31,94	37,50	34,38	72,92
3	34,72	37,50	56,25	31,94	38,54	34,38	72,92
4	34,72	38,89	56,25	31,94	37,50	33,33	72,92
5	36,11	37,50	54,17	32,64	37,50	35,42	73,96
6	34,72	38,89	56,25	31,94	37,50	34,38	72,92
7	34,72	37,50	56,25	32,64	37,50	34,38	72,92
8	36,11	38,89	56,25	31,94	37,50	33,33	73,96
9	34,72	37,50	54,17	31,94	37,50	34,38	72,92
10	34,72	37,50	56,25	31,94	38,54	34,38	72,92
11	36,11	38,89	58,33	31,94	37,50	34,38	72,92
12	34,72	37,50	56,25	31,94	37,50	34,38	72,92
13	36,11	38,89	56,25	31,94	38,54	33,33	73,96
14	34,72	37,50	56,25	31,94	37,50	34,38	72,92
15	34,72	37,50	56,25	31,94	37,50	35,42	72,92
16	36,11	38,89	56,25	31,94	38,54	33,33	72,92
17	34,72	37,50	54,17	32,64	37,50	34,38	73,96
18	34,72	37,50	56,25	32,64	38,54	34,38	72,92
19	33,33	38,89	54,17	31,94	37,50	35,42	72,92
20	34,72	36,11	56,25	32,64	38,54	33,33	73,96
Acerto médio	**34,86**	**37,85**	**55,73**	**32,15**	**37,81**	**34,22**	**73,18**
Desvio Padrão	**±0,89**	**±0,89**	**±1,15**	**±0,33**	**±0,49**	**±0,70**	**±0,46**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela E30 – Resultados para a taxa de afinidade A - sistema de 33 barras.

	Sistema de 33 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	34,72	33,33	52,08	31,25	36,46	39,58	68,75
2	36,11	33,33	52,08	30,56	35,42	38,54	69,79
3	36,11	34,72	52,08	30,56	36,46	39,58	68,75
4	36,11	33,33	52,08	30,56	35,42	38,54	69,79
5	34,72	34,72	52,08	31,25	35,42	39,58	69,79
6	36,11	34,72	54,17	30,56	35,42	39,58	68,75
7	36,11	33,33	52,08	30,56	35,42	38,54	69,79
8	36,11	34,72	52,08	30,56	36,46	39,58	68,75
9	36,11	33,33	52,08	30,56	35,42	38,54	68,75
10	34,72	34,72	52,08	30,56	35,42	39,58	68,75
11	37,50	34,72	52,08	31,25	36,46	39,58	69,79
12	36,11	33,33	52,08	30,56	35,42	38,54	68,75
13	36,11	34,72	52,08	30,56	35,42	39,58	68,75
14	34,72	33,33	52,08	31,25	35,42	39,58	69,79
15	36,11	34,72	52,08	30,56	35,42	38,54	68,75
16	36,11	34,72	54,17	30,56	35,42	39,58	69,79
17	36,11	33,33	52,08	30,56	35,42	38,54	69,79
18	36,11	34,72	52,08	31,25	36,46	38,54	68,75
19	37,50	33,33	52,08	30,56	36,46	38,54	68,75
20	36,11	33,33	52,08	31,25	36,46	38,54	68,75
Acerto médio	**35,97**	**34,03**	**52,29**	**30,76**	**35,78**	**39,06**	**69,17**
Desvio Padrão	**±0,77**	**±0,71**	**±0,64**	**±0,33**	**±0,51**	**±0,53**	**±0,52**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela E31 – Resultados para a taxa de afinidade A - sistema de 84 barras.

	Sistema de 84 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	29,17	33,33	45,83	31,25	35,42	33,33	73,96
2	27,78	34,72	43,75	30,56	34,38	33,33	73,96
3	27,78	31,94	45,83	30,56	35,42	32,29	71,88
4	29,17	33,33	43,75	31,25	34,38	33,33	73,96
5	29,17	34,72	45,83	31,25	35,42	33,33	71,88
6	27,78	33,33	43,75	30,56	35,42	32,29	73,96
7	27,78	33,33	43,75	31,25	35,42	32,29	73,96
8	27,78	34,72	43,75	31,25	34,38	33,33	73,96
9	29,17	33,33	43,75	30,56	35,42	32,29	72,92
10	27,78	31,94	43,75	31,25	35,42	32,29	73,96
11	29,17	34,72	43,75	31,25	35,42	33,33	71,88
12	27,78	33,33	45,83	31,94	34,38	32,29	73,96
13	27,78	33,33	43,75	31,94	35,42	32,29	73,96
14	26,39	34,72	45,83	31,25	35,42	32,29	73,96
15	27,78	33,33	43,75	31,94	35,42	32,29	73,96
16	27,78	34,72	41,67	31,25	35,42	32,29	73,96
17	29,17	33,33	43,75	31,94	37,50	33,33	72,92
18	26,39	34,72	45,83	31,25	35,42	32,29	73,96
19	29,17	33,33	43,75	31,94	37,50	33,33	72,92
20	27,78	33,33	43,75	31,25	35,42	32,29	72,92
Acerto médio	**28,13**	**33,68**	**44,27**	**31,28**	**35,42**	**32,71**	**73,44**
Desvio Padrão	**±0,89**	**±0,89**	**±1,15**	**±0,48**	**±0,83**	**±0,52**	**±0,79**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela E32 – Resultados para a taxa de afinidade A - sistema de 134 barras.

	Sistema de 134 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	37,50	30,56	58,33	32,64	31,25	37,50	70,83
2	36,11	30,56	56,25	34,03	32,29	36,46	72,92
3	36,11	31,94	58,33	33,33	31,25	36,46	71,88
4	36,11	31,94	58,33	33,33	32,29	36,46	71,88
5	37,50	30,56	56,25	33,33	31,25	37,50	72,92
6	37,50	31,94	58,33	33,33	32,29	37,50	71,88
7	37,50	31,94	58,33	33,33	31,25	37,50	71,88
8	37,50	31,94	58,33	32,64	32,29	38,54	72,92
9	36,11	31,94	56,25	34,03	31,25	37,50	71,88
10	37,50	31,94	58,33	33,33	32,29	38,54	71,88
11	38,89	30,56	58,33	33,33	32,29	37,50	72,92
12	37,50	31,94	58,33	33,33	32,29	37,50	71,88
13	38,89	31,94	56,25	32,64	32,29	38,54	72,92
14	36,11	31,94	58,33	34,03	31,25	37,50	71,88
15	37,50	30,56	58,33	33,33	31,25	38,54	72,92
16	37,50	31,94	58,33	33,33	31,25	37,50	71,88
17	36,11	31,94	56,25	34,03	31,25	37,50	71,88
18	37,50	31,94	58,33	33,33	32,29	37,50	71,88
19	36,11	30,56	58,33	32,64	31,25	36,46	70,83
20	37,50	30,56	58,33	32,64	32,29	36,46	70,83
Acerto médio	**37,15**	**31,46**	**57,81**	**33,30**	**31,77**	**37,45**	**72,03**
Desvio Padrão	**±0,89**	**±0,68**	**±0,93**	**±0,48**	**±0,53**	**±0,71**	**±0,70**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

E.9 Teste III – Taxa de afinidade B

Tabela E33 – Resultados para a taxa de afinidade B - sistema de 5 barras.

	Sistema de 5 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
3	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
4	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
5	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
6	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
7	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
8	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
9	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
10	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
11	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
12	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
13	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
14	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
15	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
16	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
17	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
18	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
19	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
20	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Acerto médio	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**98,65**	**100,00**
Desvio Padrão	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,76**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela E34 – Resultados para a taxa de afinidade B - sistema de 33 barras.

	Sistema de 33 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
2	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
3	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
4	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
5	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
6	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
7	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
8	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
9	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
10	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
11	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
12	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
13	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
14	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
15	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
16	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
17	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
18	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
19	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
20	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
Acerto médio	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**97,08**	**100,00**
Desvio Padrão	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,54**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela E35 – Resultados para a taxa de afinidade B - sistema de 84 barras.

	Sistema de 84 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00	100,00
3	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00	100,00
4	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00	100,00
5	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00	100,00
6	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00	100,00
7	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00	100,00
8	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00	100,00
9	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00	100,00
10	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00	100,00
11	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00	100,00
12	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00	100,00
13	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00	100,00
14	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
15	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00	100,00
16	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00	100,00
17	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00	100,00
18	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00	100,00
19	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00	100,00
20	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00	100,00
Acerto médio	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**98,85**	**100,00**	**100,00**
Desvio Padrão	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,58**	**±0,00**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela E36 – Resultados para a taxa de afinidade B - sistema de 134 barras.

	Sistema de 134 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
2	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
3	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
4	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
5	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
6	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
7	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
8	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
9	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
10	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
11	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
12	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
13	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	96,88	100,00
14	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
15	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
16	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
17	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,96	100,00
18	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
19	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
20	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	97,92	100,00
Acerto médio	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**100,00**	**98,02**	**100,00**
Desvio Padrão	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,00**	**±0,58**	**±0,00**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

E.10 Teste III – Taxa de afinidade C

Tabela E37 – Resultados para a taxa de afinidade C - sistema de 5 barras.

	Sistema de 5 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	98,61	93,06	100,00	100,00	73,96	73,96	93,75
2	98,61	95,83	95,83	99,31	75,00	72,92	92,71
3	97,22	94,44	100,00	99,31	73,96	72,92	92,71
4	98,61	95,83	100,00	99,31	73,96	72,92	92,71
5	97,22	94,44	97,92	98,61	75,00	72,92	92,71
6	97,22	94,44	100,00	99,31	73,96	73,96	93,75
7	97,22	95,83	100,00	99,31	73,96	72,92	92,71
8	97,22	94,44	95,83	98,61	73,96	72,92	92,71
9	97,22	94,44	100,00	99,31	75,00	73,96	92,71
10	97,22	95,83	97,92	99,31	73,96	72,92	92,71
11	100,00	94,44	100,00	99,31	73,96	72,92	92,71
12	97,22	94,44	100,00	99,31	73,96	72,92	93,75
13	97,22	94,44	100,00	99,31	75,00	73,96	92,71
14	97,22	94,44	100,00	98,61	73,96	72,92	92,71
15	97,22	95,83	97,92	99,31	75,00	73,96	93,75
16	100,00	94,44	100,00	98,61	73,96	72,92	92,71
17	97,22	95,83	100,00	99,31	73,96	72,92	93,75
18	97,22	94,44	97,92	99,31	73,96	73,96	93,75
19	97,22	94,44	100,00	100,00	75,00	72,92	92,71
20	97,22	93,06	100,00	100,00	73,96	73,96	93,75
Acerto médio	**97,71**	**94,72**	**99,17**	**99,27**	**74,27**	**73,28**	**93,07**
Desvio Padrão	**±0,93**	**±0,85**	**±1,42**	**±0,42**	**±0,49**	**±0,51**	**±0,51**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela E38 – Resultados para a taxa de afinidade C - sistema de 33 barras.

	Sistema de 33 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	94,44	91,67	95,83	98,61	73,96	67,71	93,75
2	95,83	93,06	95,83	99,31	71,88	68,75	94,79
3	95,83	94,44	97,92	100,00	72,92	68,75	95,83
4	97,22	91,67	95,83	99,31	71,88	68,75	94,79
5	95,83	93,06	95,83	99,31	72,92	67,71	95,83
6	95,83	91,67	95,83	100,00	73,96	67,71	94,79
7	97,22	93,06	97,92	99,31	72,92	68,75	94,79
8	95,83	93,06	95,83	98,61	72,92	68,75	94,79
9	95,83	93,06	95,83	99,31	72,92	67,71	95,83
10	95,83	91,67	95,83	99,31	71,88	67,71	94,79
11	97,22	93,06	97,92	100,00	72,92	67,71	93,75
12	95,83	93,06	95,83	99,31	73,96	68,75	94,79
13	95,83	91,67	95,83	99,31	72,92	67,71	94,79
14	95,83	93,06	95,83	98,61	71,88	67,71	93,75
15	97,22	94,44	95,83	99,31	72,92	68,75	94,79
16	95,83	91,67	97,92	99,31	72,92	67,71	95,83
17	97,22	93,06	95,83	99,31	72,92	68,75	95,83
18	94,44	93,06	97,92	100,00	72,92	68,75	94,79
19	95,83	94,44	95,83	99,31	72,92	68,75	95,83
20	94,44	91,67	95,83	98,61	73,96	67,71	95,83
Acerto médio	**95,97**	**92,78**	**96,35**	**99,31**	**72,92**	**68,23**	**95,00**
Desvio Padrão	**±0,89**	**±0,97**	**±0,93**	**±0,45**	**±0,68**	**±0,53**	**±0,72**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela E39 – Resultados para a taxa de afinidade C - sistema de 84 barras.

	Sistema de 84 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	94,44	95,83	97,92	98,61	96,88	72,92	94,79
2	95,83	94,44	95,83	98,61	97,92	72,92	92,71
3	95,83	94,44	95,83	99,31	96,88	73,96	93,75
4	94,44	94,44	95,83	98,61	97,92	72,92	93,75
5	95,83	95,83	97,92	99,31	97,92	72,92	92,71
6	95,83	94,44	95,83	99,31	96,88	72,92	93,75
7	95,83	94,44	95,83	98,61	97,92	73,96	93,75
8	95,83	94,44	95,83	98,61	97,92	72,92	93,75
9	94,44	95,83	95,83	98,61	96,88	72,92	93,75
10	95,83	94,44	95,83	98,61	97,92	73,96	92,71
11	95,83	94,44	95,83	99,31	98,96	72,92	93,75
12	95,83	94,44	97,92	98,61	97,92	72,92	93,75
13	95,83	95,83	95,83	98,61	97,92	72,92	92,71
14	94,44	94,44	95,83	98,61	96,88	73,96	94,79
15	95,83	95,83	95,83	98,61	97,92	72,92	93,75
16	95,83	94,44	95,83	98,61	96,88	72,92	93,75
17	94,44	94,44	97,92	98,61	97,92	73,96	92,71
18	95,83	94,44	95,83	98,61	96,88	73,96	92,71
19	95,83	95,83	95,83	99,31	97,92	72,92	93,75
20	94,44	95,83	97,92	98,61	98,96	73,96	94,79
Acerto médio	**95,42**	**94,93**	**96,35**	**98,78**	**97,66**	**73,28**	**93,59**
Desvio Padrão	**±0,65**	**±0,68**	**±1,56**	**±0,31**	**±0,67**	**±0,51**	**±0,70**

Fonte: Elaboração do próprio autor.

Tabela E40 – Resultados para a taxa de afinidade C - sistema de 134 barras.

	Sistema de 134 Barras						
Quantidade de execuções	*Swell*	*Sag*	*Outage*	Harmônico	*Swell* - Harmônico	*Sag*- Harmônico	Transitório Oscilatório
1	95,83	93,06	97,92	99,31	76,04	75,00	92,71
2	95,83	94,44	100,00	98,61	77,08	73,96	93,75
3	97,22	93,06	97,92	98,61	76,04	75,00	92,71
4	95,83	93,06	100,00	98,61	77,08	73,96	92,71
5	95,83	94,44	97,92	99,31	76,04	76,04	93,75
6	95,83	93,06	97,92	98,61	76,04	75,00	92,71
7	95,83	93,06	97,92	98,61	77,08	73,96	92,71
8	97,22	93,06	97,92	98,61	76,04	75,00	92,71
9	95,83	94,44	97,92	99,31	76,04	75,00	93,75
10	95,83	93,06	100,00	98,61	77,08	75,00	92,71
11	95,83	93,06	97,92	99,31	76,04	76,04	92,71
12	97,22	94,44	97,92	98,61	76,04	75,00	93,75
13	95,83	93,06	100,00	99,31	77,08	75,00	92,71
14	97,22	93,06	97,92	98,61	76,04	76,04	92,71
15	95,83	93,06	97,92	99,31	76,04	73,96	93,75
16	95,83	93,06	100,00	99,31	77,08	75,00	92,71
17	97,22	93,06	97,92	98,61	76,04	75,00	92,71
18	95,83	94,44	100,00	98,61	76,04	73,96	92,71
19	95,83	93,06	97,92	98,61	77,08	75,00	92,71
20	97,22	94,44	97,92	99,31	76,04	76,04	93,75
Acerto médio	**96,25**	**93,47**	**98,54**	**98,89**	**76,41**	**74,95**	**93,02**
Desvio Padrão	**±0,65**	**±0,65**	**±0,98**	**±0,35**	**±0,51**	**±0,71**	**±0,49**

Fonte: Elaboração do próprio autor.