

**ANDRÉIA DA SILVA SANTOS DE FARIA**

**DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS DE  
CURTO-CIRCUITO EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO  
COM A INSERÇÃO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

Ilha Solteira - SP

2020



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Câmpus de Ilha Solteira - SP

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ANDRÉIA DA SILVA SANTOS DE FARIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Câmpus de Ilha Solteira, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica  
Especialidade: Automação.

PROF<sup>a</sup>. Dra. Mara Lúcia Lopes  
**Orientadora**

Ilha Solteira - SP

2020

#### FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

F224d Faria, Andréia da Silva Santos de.  
Detecção e classificação de faltas de curto-circuito em sistemas de distribuição com a inserção de geração distribuída / Andréia da Silva Santos de Faria . -- Ilha Solteira: [s.n.], 2020  
87 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2020

Orientador: Mara Lúcia Lopes  
Inclui bibliografia

1. Análise multirresolução. 2. Detecção de faltas de curto-circuito . 3. Rede neural ARTMAP Fuzzy. 4. Sistemas de distribuição de energia elétrica . 5. Transformada *Wavelet* discreta de sobreposição máxima.

  
Raiane da Silva Santos

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO:** Detecção e classificação de faltas de curto-circuito em sistemas de distribuição com a inserção de geração distribuída

**AUTORA:** ANDRÉIA DA SILVA SANTOS DE FARIA

**ORIENTADORA:** MARA LUCIA MARTINS LOPES

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: Automação pela Comissão Examinadora:

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. MARA LUCIA MARTINS LOPES (Participação Virtual)

Departamento de Matemática / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

A handwritten signature in blue ink, reading "Mara L. M. Lopes", is positioned to the right of the printed name.

Prof. Dr. CARLOS ROBERTO MINUSSI (Participação Virtual)

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

Prof. Dr. JOSÉ GUILHERME MAGALINI SANTOS DECANINI (Participação Virtual)

Campus Presidente Epitácio / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP

Ilha Solteira, 14 de dezembro de 2020

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus por me conceder essa oportunidade, pelas bênçãos concedidas nesta caminhada e por conceder-me forças para concluir mais essa etapa na minha vida.

Agradeço aos meus pais Simone e José e aos meus irmãos Joel, Jesiel, e Sóstenes pelo apoio, incentivo e compreensão. Em especial ao meu amado esposo Lucas Teles pelo carinho, apoio, companheirismo e amor.

A minha querida orientadora Dra.Mara Lúcia Lopes pela confiança em mim creditada, pela competência e orientações durante o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os meus colegas e professores do Laboratório de Sistemas Inteligentes (Sintel) em especial ao meu colega Haislan Bernardes pelo apoio no software ATPDraw.

Às minhas amigas Andressa, Camilla, Enielma, Izabeli e Roberta, pelo apoio e companheirismo nesta jornada.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de financiamento 001.

## RESUMO

A detecção e classificação de faltas de curtos-circuitos são de fundamental importância para minorar danos a equipamentos elétricos e prevenir faltas de regime permanente ou blecautes em sistemas de Distribuição. A inserção de geração distribuída na rede de distribuição altera a topologia do sistema elétrico e afeta diretamente a corrente de curto-circuito. Nesse contexto, neste trabalho propõe-se uma metodologia alternativa para detecção e classificação de faltas de curto-circuito em sistemas de distribuição de energia elétrica trifásicos considerando a inserção de geração distribuída. A detecção baseia-se nos índices comportamentais das correntes de curto-circuito trifásicas que são extraídos por meio da Transformada *Wavelet* Discreta de sobreposição Máxima e Análise de Multirresolução. A classificação das fases em curto-circuito é realizada via uso da rede neural ARTMAP-*Fuzzy*. As diversas condições de falta foram simuladas no sistema teste IEEE-34 barras modificado. O sistema teste foi modelado no software ATPDraw e a metodologia para detecção e classificação de faltas foi implementada no software MATLAB. A técnica para detecção e classificação é robusta. Foram detectados corretamente em todos os cenários implementados, mais de 98% dos curtos-circuitos, enquanto o acerto do classificador foi superior a 98% com apenas uma execução ou época para as etapas de treinamento e teste, portanto o mesmo apresenta baixo esforço computacional.

**Palavras-chave:** Análise Multirresolução, Detecção de Faltas de Curto-Circuito, Rede Neural ARTMAP Fuzzy, Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, Transformada *Wavelet* Discreta de Sobreposição Máxima.

## ABSTRACT

The detection, as well as the classification of faults relative to short-circuit, are of fundamental importance to mitigate damages to electrical equipment and prevent faults of permanent regime or blackouts in electrical power systems. The insertion of distributed generation in the distribution network changes the topology of the electrical system and directly affects the short-circuit current. In this context, an alternative methodology aimed at detecting and classifying short-circuit faults in three-phase power distribution systems is proposed in this work with the insertion of distributed generation. The detection is made from the evaluation of the indices of three-phase short-circuit currents. These indices are obtained through the Discrete Wavelet Transform and the Multi-Resolution Analysis. The classification of the short-circuit phases is performed using the ARTMAP-Fuzzy neural network. The various fault conditions were simulated in the modified IEEE 34-bus. That test system was represented in the ATPDraw software and the methodology for fault detection and classification was implemented in the MATLAB software. The detection and classification technique is robust. More than 98% of short circuits were correctly detected, while the classifier reached 98% assertiveness with just one training and test period with low computational effort.

**Key words :** Electrical Energy Distribution Systems, Multi-Resolution Analysis, Maximal Overlap Discrete Wavelet Transform, Neural Network Fuzzy ARTMAP, Short-Circuit Fault Detection.

## LISTA DE FIGURAS

|           |                                                                                                                            |    |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1  | Diagrama unifilar SEP. . . . .                                                                                             | 16 |
| Figura 2  | Sistema de transmissão. . . . .                                                                                            | 18 |
| Figura 3  | Crescimento da energia solar fotovoltaica no Brasil. . . . .                                                               | 23 |
| Figura 4  | Emissão de $CO_2$ evitadas em 2019 (em milhões de toneladas). . . . .                                                      | 24 |
| Figura 5  | Componentes de um aerogerador. . . . .                                                                                     | 25 |
| Figura 6  | Crescimento da energia eólica no Brasil. . . . .                                                                           | 26 |
| Figura 7  | Capacidade instalada energia eólica em 2018 e 2019. . . . .                                                                | 27 |
| Figura 8  | Número de instalações de usinas termelétricas. . . . .                                                                     | 28 |
| Figura 9  | Potências instaladas (kW) em usinas termelétricas. . . . .                                                                 | 29 |
| Figura 10 | Curto-circuito monofásico com conexão com a terra: (a) curto na fase a (b) curto na fase b, e (c) curto na fase c. . . . . | 32 |
| Figura 11 | Curto-circuito monofásico fase (c). . . . .                                                                                | 32 |
| Figura 12 | Curto-Circuito bifásico: (a) fases a e b, (b) fases b e c e (c) fases a e c. . . . .                                       | 33 |
| Figura 13 | Curto-circuito bifásico entre as fases (a) e (c). . . . .                                                                  | 33 |
| Figura 14 | Curto-circuito bifásico com conexão à terra: (a) fases a e b, (b) fases b e c, e (c) fases a e c. . . . .                  | 34 |
| Figura 15 | Curto-circuito trifásico com conexão terra. . . . .                                                                        | 34 |
| Figura 16 | Curto-circuito trifásico. . . . .                                                                                          | 35 |
| Figura 17 | Modelo FAI. . . . .                                                                                                        | 36 |
| Figura 18 | Processo de decomposição do sinal. . . . .                                                                                 | 39 |
| Figura 19 | Decomposição do sinal em vários níveis. . . . .                                                                            | 40 |
| Figura 20 | Processo de filtragem sem <i>downsampling</i> . . . . .                                                                    | 41 |
| Figura 21 | Processo de filtragem com <i>downsampling</i> . . . . .                                                                    | 42 |
| Figura 22 | Sinal original. . . . .                                                                                                    | 42 |

|           |                                                                                     |    |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 23 | Coeficientes de aproximação e detalhe. . . . .                                      | 43 |
| Figura 24 | Arquitetura da rede neural ART. . . . .                                             | 47 |
| Figura 25 | Arquitetura da rede ARTMAP <i>Fuzzy</i> . . . . .                                   | 48 |
| Figura 26 | Fluxograma ARTMAP <i>Fuzzy</i> . . . . .                                            | 53 |
| Figura 27 | Decomposição do sinal. . . . .                                                      | 55 |
| Figura 28 | Comparativo de valores de curto-circuito com e sem conexão com à terra. . . . .     | 58 |
| Figura 29 | Fluxograma da metodologia para detecção e classificação de curto-circuitos. . . . . | 59 |
| Figura 30 | Sistema IEEE-34 barras sem GD. . . . .                                              | 62 |
| Figura 31 | Sistema IEEE-34 barras com 2 GDs. . . . .                                           | 63 |
| Figura 32 | Sistema IEEE-34 barras com 4 GDs. . . . .                                           | 63 |
| Figura 33 | Resultados das simulações para detecção de faltas para os cenários 1 e 2. . . . .   | 66 |
| Figura 34 | Resultados das simulações para detecção de faltas para o cenário 3. . . . .         | 66 |
| Figura 35 | Resultados das simulações para detecção de faltas para o cenário 4. . . . .         | 67 |
| Figura 36 | Resultados classificações para o cenário 1. . . . .                                 | 69 |
| Figura 37 | Resultados classificações para o cenário 2. . . . .                                 | 69 |
| Figura 38 | Resultados classificações para o cenário 3. . . . .                                 | 70 |
| Figura 39 | Resultados classificações para o cenário 4. . . . .                                 | 70 |
| Figura 40 | Sistema teste IEEE-34 nós balanceado ATPDraw. . . . .                               | 83 |
| Figura 41 | Sistema teste IEEE-34 nós desbalanceado ATPDraw. . . . .                            | 84 |
| Figura 42 | Relatório de classificação: curto-circuito bifásico cenário 4. . . . .              | 85 |

## LISTA DE TABELAS

|           |                                                                        |    |
|-----------|------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1  | Técnicas de geração. . . . .                                           | 22 |
| Tabela 2  | Classificação das turbinas eólicas. . . . .                            | 25 |
| Tabela 3  | Instalações de termelétricas- Biomassa. . . . .                        | 28 |
| Tabela 4  | Instalação de unidades PCHs e CGHs e potência instalada. . . . .       | 28 |
| Tabela 5  | Principais parâmetros da rede neural ARTMAP <i>Fuzzy</i> . . . . .     | 50 |
| Tabela 6  | Codificação de saída da rede ARTMAP <i>Fuzzy</i> . . . . .             | 60 |
| Tabela 7  | Parâmetros das simulações para os cenários 1 e 2. . . . .              | 64 |
| Tabela 8  | Parâmetros das simulações para os cenários 3 e 4. . . . .              | 64 |
| Tabela 9  | Limite de variação das correntes trifásicas. . . . .                   | 65 |
| Tabela 10 | Parâmetros da Rede ARTMAP <i>Fuzzy</i> para os cenários 1 e 2. . . . . | 67 |
| Tabela 11 | Parâmetros Rede ARTMAP <i>Fuzzy</i> para os cenários 3 e 4. . . . .    | 68 |
| Tabela 12 | Dados bancos de capacitores. . . . .                                   | 79 |
| Tabela 13 | Dados dos transformadores. . . . .                                     | 79 |
| Tabela 14 | Dados de linhas. . . . .                                               | 80 |
| Tabela 15 | Configuração das linhas de distribuição. . . . .                       | 81 |
| Tabela 16 | Cargas concentradas. . . . .                                           | 81 |
| Tabela 17 | Cargas distribuídas. . . . .                                           | 82 |

## SUMÁRIO

|          |                                            |           |
|----------|--------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>                          | <b>10</b> |
| 1.1      | Objetivo e Contribuições                   | 10        |
| 1.2      | Revisão Bibliográfica                      | 11        |
| 1.3      | Organização do texto                       | 14        |
| <b>2</b> | <b>SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA</b>        | <b>15</b> |
| 2.1      | GERAÇÃO                                    | 16        |
| 2.2      | TRANSMISSÃO                                | 17        |
| 2.3      | DISTRIBUIÇÃO                               | 19        |
| 2.3.1    | Subtransmissão                             | 19        |
| 2.3.2    | Subestação de Distribuição                 | 20        |
| 2.3.3    | Rede Primária                              | 20        |
| 2.3.4    | Rede Secundária                            | 20        |
| <b>3</b> | <b>GERAÇÃO DISTRIBUÍDA</b>                 | <b>21</b> |
| 3.1      | TIPOS DE FONTES DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA     | 22        |
| 3.2      | ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA                 | 23        |
| 3.3      | ENERGIA EÓLICA                             | 23        |
| 3.4      | BIOMASSA                                   | 25        |
| 3.5      | HIDRÁULICA                                 | 26        |
| 3.5.1    | Princípio de Funcionamento e Estrutura PCH | 27        |
| 3.5.2    | Gerador Síncrono                           | 30        |
| <b>4</b> | <b>CURTOS-CIRCUITOS</b>                    | <b>31</b> |

|          |                                                                     |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.1      | TIPOS DE CURTOS-CIRCUITOS                                           | 31        |
| 4.1.1    | <b>Curto-Circuito Monofásico com conexão com a terra</b>            | <b>31</b> |
| 4.1.2    | <b>Curto-circuito Bifásico</b>                                      | <b>32</b> |
| 4.1.3    | <b>Curto-circuito bifásico com conexão com a terra</b>              | <b>33</b> |
| 4.1.4    | <b>Curto-circuito trifásico com conexão com a terra</b>             | <b>34</b> |
| 4.2      | FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA                                            | 35        |
| <b>5</b> | <b>TRANSFORMADA <i>WAVELET</i></b>                                  | <b>37</b> |
| 5.1      | TRANSFORMADA <i>WAVELET</i> CONTÍNUA (TWC)                          | 37        |
| 5.2      | TRANSFORMADA <i>WAVELET</i> DISCRETA (TWD)                          | 38        |
| 5.3      | ANÁLISE MULTIRRESOLUÇÃO                                             | 39        |
| 5.4      | FILTROS                                                             | 41        |
| 5.4.1    | <b>Haar</b>                                                         | <b>41</b> |
| 5.4.2    | <b>Daubechies</b>                                                   | <b>43</b> |
| 5.5      | TRANSFORMADA <i>WAVELET</i> DISCRETA DE SOBREPOSIÇÃO MÁXIMA (MODWT) | 44        |
| <b>6</b> | <b>TEORIA DA RESSONÂNCIA ADAPTATIVA</b>                             | <b>46</b> |
| 6.1      | REDE ART                                                            | 46        |
| 6.2      | REDE NEURAL ARTMAP <i>FUZZY</i>                                     | 48        |
| 6.3      | ALGORITMO DE TREINAMENTO ARTMAP <i>FUZZY</i>                        | 49        |
| 6.3.1    | <b>Dados de Treinamento</b>                                         | <b>49</b> |
| 6.3.2    | <b>Vetores Pesos</b>                                                | <b>49</b> |
| 6.3.3    | <b>Parâmetros</b>                                                   | <b>50</b> |
| 6.3.4    | <b>Escolha de Categorias</b>                                        | <b>50</b> |
| 6.3.5    | <b>Ressonância ou <i>Reset</i></b>                                  | <b>51</b> |
| 6.3.6    | <b><i>Match-Tracking</i></b>                                        | <b>51</b> |

|              |                                                  |           |
|--------------|--------------------------------------------------|-----------|
| <b>6.3.7</b> | <b>Aprendizagem</b>                              | <b>52</b> |
| <b>6.4</b>   | <b>FASE DE TESTE</b>                             | <b>52</b> |
| <b>7</b>     | <b>METODOLOGIA</b>                               | <b>54</b> |
| <b>7.1</b>   | <b>DETECÇÃO DE FALTAS DE CURTO-CIRCUITO</b>      | <b>54</b> |
| <b>7.1.1</b> | <b>Decomposição do Sinal</b>                     | <b>54</b> |
| <b>7.1.2</b> | <b>Energia do Sinal</b>                          | <b>55</b> |
| <b>7.1.3</b> | <b>Normalização</b>                              | <b>56</b> |
| <b>7.1.4</b> | <b>Detecção</b>                                  | <b>56</b> |
| <b>7.2</b>   | <b>CURTO COM CONEXÃO COM A TERRA</b>             | <b>57</b> |
| <b>7.3</b>   | <b>CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS DE CURTO-CIRCUITO</b> | <b>58</b> |
| <b>8</b>     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>                   | <b>61</b> |
| <b>8.1</b>   | <b>SISTEMA TESTE IEEE-34 BARRAS MODIFICADO</b>   | <b>61</b> |
| <b>8.2</b>   | <b>DETECÇÃO DE FALTAS DE CURTO-CIRCUITO</b>      | <b>64</b> |
| <b>8.2.1</b> | <b>Sistemas Equilibrados</b>                     | <b>64</b> |
| <b>8.2.2</b> | <b>Sistemas Desequilibrados Cenário 4</b>        | <b>65</b> |
| <b>8.3</b>   | <b>CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS</b>                   | <b>67</b> |
| <b>9</b>     | <b>CONCLUSÃO</b>                                 | <b>71</b> |
| <b>9.1</b>   | <b>SUGESTÃO TRABALHOS FUTUROS</b>                | <b>72</b> |
|              | <b>REFERÊNCIAS</b>                               | <b>73</b> |
|              | <b>APÊNDICE A - Sistema Teste IEEE-34 Barras</b> | <b>79</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Os Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) estão continuamente sujeitos a ocorrências de faltas por diversos fatores como: descargas atmosféricas, falhas nos equipamentos do sistema em razão do envelhecimento e erro humano. A falta é caracterizada pelo desvio das condições operacionais padrão do sistema elétrico. Classifica-se a falta em temporária ou permanente. A falta temporária ocorre em um curto período; após o qual, o sistema elétrico regressa ao estado normal de operação. A falta permanente requer que o curto-circuito seja identificado e removido para que o sistema elétrico volte a operar normalmente (GURURAJA-PATHY et al., 2017).

A inserção da Geração Distribuída (GD) pode proporcionar inúmeros benefícios ao sistema elétrico, como a redução da emissão de poluentes e gases que intensificam o efeito estufa provenientes de fontes de geração termoeletricas baseadas em combustíveis fósseis (CHAITANYA; YADAV, 2018) . No entanto, a inserção massiva de GD altera as configurações tradicionais do SDEE, o sistema passa a ser alimentado por múltiplas fontes perdendo suas características radiais. Como resultado, o funcionamento do sistema de proteção convencional pode não ser efetivo em razão da alteração do nível e características da corrente de curto-circuito. (EL-ZONKOLY, 2011; RAZAVI et al., 2019).

Neste contexto, torna-se crucial que sejam desenvolvidas técnicas para detecção e classificação de faltas de curto-circuito que levem em consideração as constantes mudanças introduzidas nos SDEE.

### 1.1 Objetivo e Contribuições

O presente trabalho tem como principal objetivo desenvolver uma metodologia alternativa para detecção e classificação de faltas de curto-circuito em SDEE equilibrados e desequilibrados com a inserção de Geração Distribuída (GD). A técnica para detecção e classificação engloba tanto Faltas de Alta Impedância (FAI) quanto falta de derivação normal, ou seja, Faltas de Baixa Impedância (FBI).

Adicionalmente, com a aprovação da normativa N° 482 da ANEEL (2012), a GD foi regulamentada no Brasil, o que potencializou a expansão significativa da mesma, com destaque para

a geração solar fotovoltaica. Nesse contexto, ressalta-se a importância do desenvolvimento de metodologias com novas técnicas ou adaptação das técnicas existentes, para detecção e classificação de faltas que considerem a nova realidade dos SDEE com a inserção massiva de GD. Uma vez que a alta penetração de GDs podem impactar diretamente no sistema de proteção em razão da alteração da topologia do sistema elétrico. Sendo assim, as principais contribuições deste trabalho são:

- Desenvolvimento de uma metodologia simples e eficaz para detecção de faltas de curto-circuito;
- Detecção automática de FAI e FBI em SDEE equilibrados e desequilibrados por meio da análise dos sinais das correntes trifásicas medidos na saída da Subestação, no qual empregou-se a Transforma *Wavelet* Discreta de Sobreposição Máxima (MODWT);
- Introdução de cenários considerando sistema equilibrado e desequilibrado, variando o número de geradores distribuídos ao longo do sistema, a fim de verificar o impacto da GD no processo de detecção e classificação;
- Classificação dos curtos-circuitos via rede neural ARTMAP-*Fuzzy*.

## 1.2 Revisão Bibliográfica

A detecção e a classificação de faltas de curto-circuito é tema central de várias publicações da literatura especializada. Diversas técnicas foram desenvolvidas ao longo dos anos, nas quais aplicaram-se técnicas como: Transformada de Fourier (TF); Transforma *Wavelet*; Análise de Multirresolução (AMR); Sistema de Inferência Fuzzy; Redes Neurais Artificiais (RNAs) entre outros. A seguir apresentam-se alguns trabalhos revelantes desenvolvidos para detecção e classificação de faltas.

Bretas et al. (2006) apresentam uma proposta para detecção e localização de FAI em SDEE com penetração de GD. A técnica de detecção de falta baseia-se nos componentes harmônicos de 1ª, 2ª, 3ª e 5ª ordem dos componentes simétricos dos fasores de corrente medidos no terminal local. Uma rede neural artificial (RNA) do tipo *perceptron multicamadas* (PMC) foi treinada via algoritmo de retropropagação ou *Backpropagation* (BP). Essa rede fornece em seu vetor de saída o tipo de curto-circuito e as respectivas fases envolvidas na falta. A localização da falta é baseada em duas diferentes redes neurais, sendo uma rede treinada para faltas em uma ou mais fases (sem a presença da terra) e outra para faltas à terra.

Salim et al. (2008) apresentam um esquema híbrido para diagnóstico de faltas em sistema de distribuição. O método consiste de três diferentes etapas: detecção e classificação de faltas, Localização da Falta (LF) e a determinação da seção em falta. O processo de detecção e classificação foi realizado com o emprego da Transformada *Wavelet* (TW). O algoritmo de localização é iniciado após a detecção e classificação da falta. O sistema foi dividido em ramos. Para cada ramo, calcula-se uma LF que é baseada em impedância. Finalmente, a seção em falta foi estimada via RNA *feedforward* com algoritmo de treinamento *Levenberg- Marquardt*, no qual se aplicou os sinais de correntes e tensão.

Oleskovicz et al. (2009) desenvolveram um sistema híbrido para detectar, classificar e localizar distúrbios que afetam a qualidade de energia. A TW foi aplicada para detectar e localizar o horário da ocorrência, enquanto no processo de classificação dos distúrbios, avaliou-se a eficiência de duas redes neurais: *Perceptron Multicamadas* (PMC) e Função de Base Radial (RBF).

El-Zonkoly (2011) propôs um esquema para detecção, classificação e localização de faltas em SDEE com a introdução de geradores distribuídos baseado em sistemas multiagentes. Os agentes de retransmissão foram instalados ao longo do sistema de distribuição dividindo-o em diversas seções. A divisão objetivou o isolamento da falta, ou seja, cada seção de rede pode ser isolada do restante do sistema caso ocorra uma falta dentro dela. Para isso, os disjuntores (CBs) foram abertos em seus pontos de interconexão. A técnica empregou a *Wavelet* mãe *Symlets* e a entropia de *Shannon*. A entropia dos coeficientes *Wavelet* das correntes trifásicas medidas pelos agentes de relé são aplicadas no processo de diagnóstico. O tipo de falta é determinado empregando a soma das entropias absolutas dos coeficientes *Wavelet* dos componentes de Clarke. Em seguida, as fases envolvidas na falta são determinadas pela soma das entropias absolutas dos coeficientes *Wavelet* das correntes trifásicas. E por fim, a localização é realizada por meio dos valores da soma das entropias absolutas dos coeficientes *Wavelet* dos componentes de Clarke.

Decanini et al. (2012) propõem uma metodologia para diagnóstico automático de faltas de curto-circuito em alimentadores de distribuição. O processo de detecção de faltas baseia-se na análise estatística e direta das formas de onda no domínio *Wavelet*. As características de tensão e corrente foram extraídas via Transformada *Wavelet* Discreta (TWD), Análise Multiresolução e conceito de Energia, no qual o sinal foi decomposto em três níveis de resolução. Um conjunto de redes neurais ARTMAP *Fuzzy* foi introduzido para classificar as fases envolvidas na falta.

Bíscaro et al. (2015) apresentaram uma metodologia para análise automática de perturbações e localização de faltas em SDEE. A detecção contínua dos distúrbios baseia-se na análise estatística e análise de sinais no domínio *Wavelet*. Técnicas como: TWD, Análise de Multiresolução e conceito de energia do sinal foram aplicadas para extração das características dos

sinais de tensão e corrente. O processo de diagnóstico de curto-circuito é realizado em conjunto com a análise de qualidade de energia, no qual foi introduzido redes neurais ARTMAP *Fuzzy* distintas com treinamentos independentes; o que proporcionou a funcionalidade dos módulos de forma independente.

Dehghani et al. (2016) introduziram uma combinação de Entropia Singular *Wavelet* (ESW) e Lógica *Fuzzy* para detecção e classificação de faltas em linhas de distribuição com a inserção de GD. As características das correntes trifásicas são extraídas por meio do método ESW, composto pela TW, Decomposição de Valor Singular (DVS) e Entropia de *Shannon*. Esses recursos são fornecidos como entrada para o módulo de lógica *Fuzzy*, cujo objetivo, foi detectar faltas no sistema e classificá-las.

Gururajapathy et al. (2017) apresentaram uma revisão contendo as principais técnicas desenvolvidas ao longo dos anos para detecção e localização de faltas em SDEE com inserção de GD. As principais técnicas revisadas pelos autores foram divididas em métodos convencionais e técnicas de inteligência artificial. Os métodos convencionais incluem: método de onda viajante e método baseado em impedância. Enquanto as técnicas de inteligência artificial incluem: Redes Neurais Artificiais (RNA), Máquina de Vetor de Suporte (MVS), Lógica *Fuzzy* e Algoritmo Genético.

Gadanayak e Mallick (2019) propuseram uma nova técnica para detecção de FAI em alimentadores de distribuição. A técnica baseia-se na análise de conteúdo inter-harmônicas no sinal de corrente por meio da Transformada *Wavelet* Packet Discreta de Sobreposição Máxima ou *Maximum overlap discrete wavelet packet transform - MODWPT*. A Decomposição de Modo Empírico modificada (DME) que é baseada em nós especiais, foi introduzida para separar os harmônicos não inteiros e os harmônicos inteiros dos dos sinais obtidos no processo de decomposição via MODWPT.

Bernardes (2019) propôs uma metodologia para detecção e classificação de faltas de curto-circuito em etapa única. A técnica foi baseada nas medições constantes das correntes trifásicas realizadas na saída da subestação, na qual foi aplicada a AMR para decomposição dos sinais em três níveis de resolução via filtro (db4). No processo de detecção-classificação foram aplicados os coeficientes de detalhes e aproximação do terceiro nível de resolução. A energia dos sinais foi calculada para composição do vetor de entrada da rede neural ARTMAP-*Fuzzy* cuja função é identificar o curto-circuito e classificá-lo.

Ledesma et al. (2020) Apresentaram um novo método para localização e identificação de FAI em redes de média tensão em sistemas de distribuição desbalanceados. O método foi baseado em dois conjuntos de RNAs, no qual foram aplicados dados de unidades de medidas

sincronizadas. A rede neural *Multiple Layer Feedforward* foi aplicada com treinamento via BP. Na primeira etapa, a localização da área da falta é identificada, bem como a respectiva fase da falta; enquanto na segunda etapa, é informada a localização por meio da distância aproximada da falta dentro da área.

### 1.3 Organização do texto

O presente trabalho está organizado em 9 capítulos e um apêndice. Neste capítulo de introdução foram apresentados os principais objetivos, contribuições e a revisão bibliográfica das principais técnicas desenvolvidas para detecção e classificação de faltas de curto-circuito.

No capítulo 2, apresenta-se uma visão geral do Sistema Elétrico de Potência (SEP), os subsistemas que o compõem e suas respectivas funções.

No capítulo 3, faz-se uma breve introdução a respeito das fontes de GD. Em seguida, são apresentadas as fontes de energias renováveis: Solar fotovoltaica, Eólica, Biomassa e Hidráulica.

No capítulo 4, são apresentados os principais tipos de curtos-circuitos, causas e percentual de ocorrências. Também apresenta-se o modelo FAI implementado neste estudo.

No capítulo 5, apresenta-se a Transformada *Wavelet*, Transformada *Wavelet* Contínua (TWC), Transformada *Wavelet* Discreta (TWD) e por fim a MODWT introduzida neste trabalho para análise de sinais.

No capítulo 6, abordam-se as redes neurais da Família ART (Adaptive Resonance Theory). São apresentados os principais conceitos, estrutura e algoritmo de treinamento da rede ARTMAP *Fuzzy*.

No capítulo 7, apresenta-se a metodologia para detecção e classificação de falta de curto-circuito em SDEE.

No capítulo 8, são apresentados os resultados obtidos na fase de implementação dos algoritmos de detecção e classificação em um alimentador real.

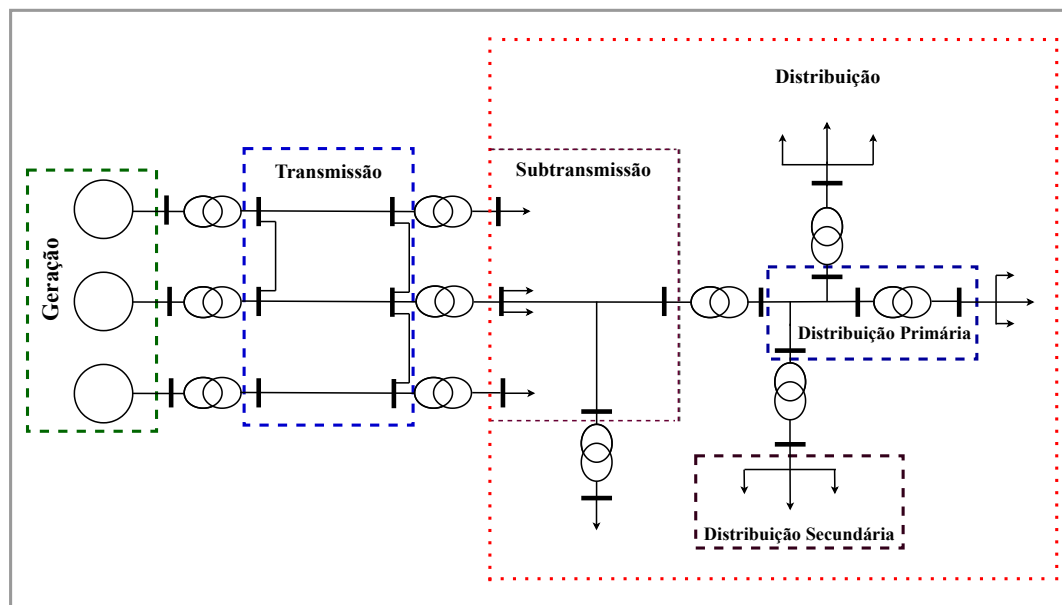
No capítulo 9, são apresentadas as conclusões deste estudo e os respectivos trabalhos futuros.

## 2 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

O SEP tem como principal objetivo o fornecimento contínuo de energia elétrica, no instante solicitado e com a respectiva qualidade adequada, isto é, com um número mínimo de interrupções (KAGAN et al., 2005). O SEP consiste de quatro principais sistemas, sendo: sistema de geração, transmissão, subtransmissão e distribuição (GONEN, 2014). A seguir apresentam-se os subsistemas que compõem o SEP, e suas principais funções de acordo com (KAGAN et al., 2005; SATO; FREITAS, 2015):

- **Geração:** Processo de geração de energia elétrica a partir da conversão de fontes de energia primária (hidráulica, eólica, solar, térmica) em energia mecânico-motriz que será convertida em energia elétrica por um gerador elétrico síncrono (na maioria dos casos) ou gerador de indução no caso particular da geração eólica.
- **Subestação Elevadora (SE):** Para realizar o transporte da energia elétrica gerada, faz-se necessário elevar a tensão de geração para a tensão de transmissão, para isso, é utilizado uma SE. A determinação do valor da tensão está diretamente ligada com a distância a ser percorrida, e do montante de energia a ser transportado.
- **Transmissão:** O sistema de transmissão realiza o transporte de energia elétrica dos centros geradores para os centros de consumos e distribuição.
- **Subestação Abaixadora de Subtransmissão:** É responsável pelo abaixamento da tensão, para que a mesma seja compatível com a demanda de grandes consumidores que utilizam tensão em nível de subtransmissão.
- **Sistema de Subtransmissão:** Responsável pela transmissão de energia elétrica em nível de subtransmissão.
- **Subestações de Distribuição:** são responsáveis pela redução da tensão de subtransmissão para o nível de distribuição primária.
- **Sistema de Distribuição Primária:** Realiza a distribuição da energia elétrica para os consumidores de tensão em nível de distribuição primária ou média tensão;
- **Transformadores de Distribuição:** Transforma a energia primária para nível de distribuição secundária.

Figura 1 - Diagrama unifilar SEP.



Fonte: Kagan et al. (2005).

- **Sistema de Distribuição Secundária:** Distribui a energia para consumidores em nível de tensão secundária ou baixa tensão, ou seja, 127 V (tensão fase-neutro) e 220 V (tensão fase-fase).

Na Figura 1 apresenta-se o diagrama unifilar padrão do SEP, formulado por três usinas, um conjunto de linhas que compõem o sistema de transmissão, e por fim, o sistema de distribuição, composto por um sistema de subtransmissão, uma rede primária e três redes secundárias. Vale ressaltar que, normalmente os sistemas de distribuição com redes primárias operam de forma radial, enquanto, os sistemas de distribuição com redes secundárias podem operar tanto em malha quanto radialmente (KAGAN et al., 2005).

## 2.1 GERAÇÃO

A geração é um seguimento da indústria de eletricidade responsável pela conversão de energia elétrica a partir de fontes primárias. A energia gerada é injetada nos sistemas de transmissão e distribuição para que seja enviada aos respectivos consumidores (ABEEOLICA, 2019).

As três principais fontes de energia primárias aplicadas mundialmente em grande escala para geração de energia elétrica são: fóssil, hídrica e nuclear (PINTO, 2014). No Brasil, o segmento de geração é bem diversificado. No terceiro trimestre de 2019, o Brasil segundo a

ANEEL (2019), possuía 7.240 unidades geradoras, sendo 40 % desses empreendimentos usinas termelétricas de médio porte. Em termos de potência instalada, a geração predominante é a hidroeletricidade que possui aproximadamente 98.581.478 kW o que equivale a 60% de representatividade na matriz energética brasileira. A energia elétrica também pode ser gerada a partir de fontes renováveis como: Energia Solar Fotovoltaica, Eólica, Biomassa e Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) abordadas no Capítulo 3.

## 2.2 TRANSMISSÃO

A energia elétrica proveniente das unidades geradoras é transmitida para os centros de consumo, grandes usuários industriais e redes de distribuição primária por meio do sistema de transmissão, constituído por um conjunto de linhas de transmissão, subestações de transformação, torres, sistema de controle e proteção (GONEN, 2014; ABRADÉE, 2019).

As linhas de transmissão (LT) são um dos componentes mais importantes do SEP e transportam energia em massa por longas distâncias. São basicamente formadas por cabos condutores metálicos alocados em torres, e tem como principal função, transmitir a energia elétrica, com o mínimo de perdas, dos centros geradores até os consumidores, geralmente, separados por longas distâncias. As LTs podem ser classificadas quanto ao nível de tensão transmitido e comprimento conforme listado abaixo (IEEE, 2011; PINTO, 2014):

- Transmissão: 750, 500, 230, 138, e 69 kV;
- Subtransmissão: 138, 69, 34,5 kV;
- Linhas Longas: comprimento > 249 km;
- Linhas Médias: 80 km ≤ comprimento ≤ 249 km;
- Linhas Curtas: comprimento < 80 km.

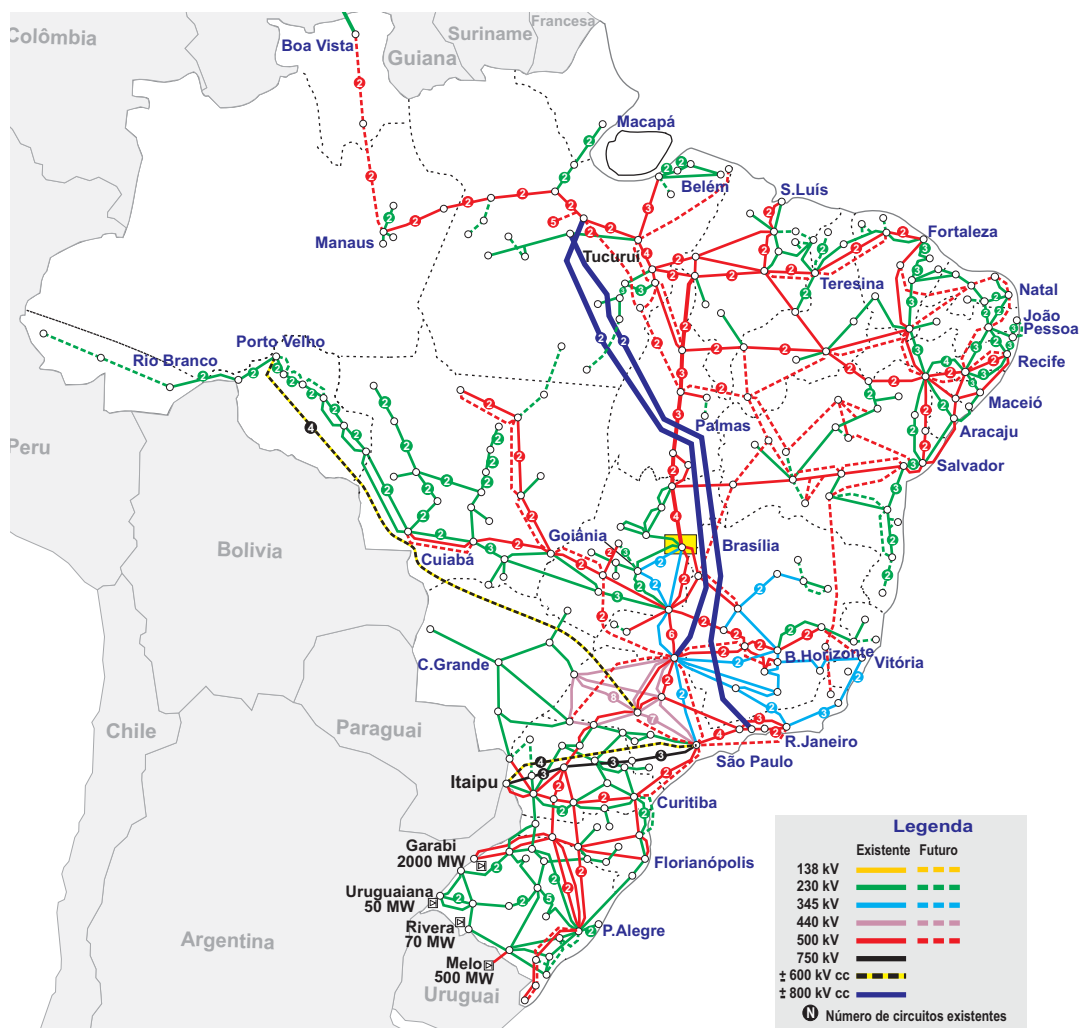
A normativa N° 414/2010 da Aneel, estabelece condições para o fornecimento de energia elétrica, no qual se define um código para cada faixa de tensão que representa todo conjunto de linhas pertencentes a mesma categoria, tais como:

- A1: Tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV ;
- A2: Tensão de fornecimento de 88 kV a 138 kV ; ;
- A3: Tensão de fornecimento 69 kV;

- A3a: Tensão de fornecimento de 30 kV a 44 kV;
- A4 : Tensão de fornecimento 2,3kV a 25 kV;

As LTs com tensão igual ou superior a 230 kV, ou seja, aquelas que se enquadram na categoria A1, compõem a rede básica ou Sistema Interligado Nacional (SIN) (ABRADEE, 2019). Nessa categoria mais de 145.000 km de LTs, são administrados por aproximadamente 156 concessionárias dos serviços públicos de transmissão (ABRADEE, 2019). Na Figura 2 apresenta-se o mapa do sistema de transmissão, no qual contém as atuais instalações no Brasil, e o respectivo planejamento de futuras instalações até 2024. O SIN é composto por quatro subsistemas: Sul, Sudeste / Centro-Oeste, Nordeste e grande parte da região norte. A interconexão dos sistemas elétricos via malha de transmissão, viabiliza a transferência de energia entre subsistemas, e proporciona ganhos sinérgicos (ONS, 2020).

Figura 2 - Sistema de transmissão.



Fonte: ONS (2020).

A transmissão de energia elétrica pode ser realizada via Corrente Contínua (CC) ou Corrente Alternada (CA). Ressalta-se, que a transmissão, na maior parte, é realizada via CA em todo mundo. No entanto, há determinadas aplicações em que a transmissão em CC proporcionam vantagens econômicas ou desempenho distintos. As principais características são apresentadas a seguir de acordo com (PINTO, 2014):

- **Transmissão em CC:** é caracterizada pela ausência de fases. É composta por dois polos, sendo: um negativo e outro positivo. A frequência em uma linha de transmissão CC é zero. As principais vantagens são: ausência de indutância ou capacitância; inexistência do efeito pelicular, dessa forma, toda área do condutor é utilizada; não existe perdas dielétricas, particularmente no caso dos cabos.
- **Transmissão em CA:** predominante na grande parte dos sistemas, incluindo a geração e distribuição de energia elétrica. As principais vantagens dessa modalidade de transmissão são: geração de potência em altas tensões; manutenção de subestações simples e baixo custo e facilidade para elevar ou abaixar a tensão via transformadores de forma eficiente, o que viabiliza transportar a energia com tensões elevadas e distribuí-la em níveis seguros.

## 2.3 DISTRIBUIÇÃO

O SDEE representa o estágio final de transferência de energia elétrica para os consumidores finais e podem ser compostos por linhas de alta, média e baixa tensão. As linhas de transmissão com tensão entre 69 kV e 138 kV compõem o sistema de subtransmissão, no qual grande parte é administrada por distribuidoras de energia elétrica (ABRADEE, 2019).

Na grande maioria, os sistemas de distribuição são projetados de forma radial, exceto em algumas cidades que usam topologia malhada. Os sistemas radiais tradicionais são compostos basicamente por uma fonte de energia que se origina em uma subestação, na qual a tensão é reduzida (IEEE, 2011).

### 2.3.1 Subtransmissão

O sistema de subtransmissão tem como principal função captar a energia das subestações de subtransmissão e transportá-la às Subestações de distribuição e aos respectivos consumidores de tensão em nível de subtransmissão. O transporte é realizado por meio de linhas trifásicas que normalmente operam em tensões, de 138 kV ou 69 kV (KAGAN et al., 2005).

Além das redes de subtransmissão, o SDEE opera em linhas de baixa e média tensão, também denominadas de redes primárias e secundárias.

### 2.3.2 Subestação de Distribuição

Em uma subestação de distribuição realiza-se a conversão de circuitos de subtransmissão para o nível de distribuição primária por meio de transformadores de potência. Normalmente, a subestação de distribuição é conectada em estrela-triângulo aterrada para o fornecimento de uma fonte de aterramento para o neutro da distribuição, que também viabiliza o isolamento do sistema de aterramento de distribuição do sistema de subtransmissão (GONEN, 2014).

Segundo Gönen (2008) os principais componentes pertencentes às subestações de distribuição são: Transformadores de tensão; Disjuntores; Interruptor de desconexão; Barramentos; Reatores limitadores de corrente; Reatores de derivação; Transformadores de corrente; Transformadores de potencial; Transformadores de potencial capacitivos; Capacitores de acoplamento; Capacitores em série; Capacitores Shunt; Sistema de aterramento; Para-raios; Relés de proteção e outros equipamentos

### 2.3.3 Rede Primária

As redes de distribuição primária, ou de média tensão podem ser divididas em duas categorias: aérea e subterrânea. A rede aérea com topologia radial, possui capacidade de transferência de blocos de carga entre circuitos para o atendimento de operação em condições de contingência, geradas a partir de manutenções preventivas ou corretivas. As linhas de média tensão possuem tensão elétrica entre 2,3 kV e 44 kV respectivamente; e atendem aos consumidores primários e aos transformadores de distribuição, estações de transformação que suprem a rede secundária ou de baixa tensão (KAGAN et al., 2005; ABRADDEE, 2019).

### 2.3.4 Rede Secundária

As redes de distribuição secundária ou de baixa tensão, possuem tensão elétrica que variam entre 110 a 480 V. Originam-se das Estações transformadoras (ETs) que são responsáveis pela redução da tensão primária, ou média tensão para distribuição secundária. As redes de baixa tensão podem operar em malha ou radialmente e levam a energia elétrica para consumidores residenciais e pequenos comércios ou indústrias via ramais de ligação. Nessa categoria, predominam-se os consumidores residenciais (KAGAN et al., 2005; ABRADDEE, 2019).

### 3 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A expansão da geração de energia elétrica tornou-se crucial em razão do crescente aumento da demanda de carga. O suprimento dessa demanda, pode evitar impactos econômicos significativos gerados em decorrência de blecautes. Além disso, devido a longa distância entre as usinas de geração de energia e as cargas, o transporte da eletricidade torna-se um grande desafio, em razão das perdas de energia que possuem valores significativos. A longa distância entre geração e carga é mais verdade para o Brasil, onde a geração predominante hidráulica é caracterizada pela distância aos centros consumidores. Em contrapartida, a maior parte dos países são abastecidos por termoeletricas que são aproximadamente próximas dos centros de consumo. A instalação de unidades de GD pode reduzir os problemas mencionados acima.

Define-se GD como unidades geradoras de energia elétrica que possuem instalações ligadas diretamente no sistema elétrico de distribuição, ou por meio de instalações de consumidores, sendo capaz de operar em paralelo ou de forma isolada e despachadas (ANEEL, 2016).

A introdução de unidades de GDs renováveis como fontes alternativas para geração de energia elétrica vem crescendo nos últimos anos (CHAITANYA; YADAV, 2018), um dos fatores importantes para tal expansão, é a capacidade de atender grande parte da crescente demanda de energia. Além disso, as instalações próximas aos centros consumidores resulta na minimização das perdas de energia. A preocupação com a redução dos impactos ambientais tem sido crucial para fomentar a expansão e investimentos em fontes de energias renováveis, uma vez que o aumento de instalações de GDs pode resultar na redução da emissão de gases que intensificam o efeito estufa (RAZAVI et al., 2019).

O SDEE pode sofrer grandes impactos em razão da inserção massiva de GD. Esses impactos dependem das características operacionais do sistema, e características das GDs, e podem se manifestar de forma positiva ou negativa. Enumeram-se os aspectos positivos de acordo com (BARKER; MELLO, 2000; RAZAVI et al., 2019; ANEEL, 2018):

- Minimização das perdas em decorrência da redução da distância entre geração e carga;
- Redução da emissão de gases que intensificam o efeito estufa;
- Diversificação da matriz energética;
- Redução do carregamento da rede;

- Melhoramento da confiabilidade do sistema de energia;
- Adiamento de investimentos para expansão dos sistemas de distribuição;
- Baixo impacto ambiental.

A GD pode ser baseada em fontes renováveis ou fontes não renováveis. Na Tabela 1 são apresentadas as principais técnicas de geração para ambas categorias.

Tabela 1 - Técnicas de geração.

| Fontes renováveis | Fontes não renováveis    |
|-------------------|--------------------------|
| Hidráulica        | Gás Natural              |
| Biomassa          | Óleo Diesel/ Combustível |
| Eólica            | Carvão                   |
| Fotovoltaica      | Nuclear                  |

Fonte: adaptado de ANEEL (2019).

### 3.1 TIPOS DE FONTES DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

As GDs podem ser classificadas de acordo com suas características em relação à capacidade de fornecimento de potência ativa (P) e reativa (Q). Enumeram-se as classificações de acordo com (HUNG et al., 2010; RAZAVI et al., 2019):

1. GD com injeção de (P) : Esse tipo de GD é conectada à rede principal por meio de inversores/Conversores. A geração fotovoltaica, microturbinas e células de combustível são exemplos desse tipo de configuração.
2. GD com injeção de (Q) : essas unidades operam com fator de potência zero, suprimindo a potência reativa necessária dos sistemas de distribuição. Os compensadores síncronos se enquadram nessa configuração.
3. GD com injeção de (P) e (Q): baseia-se em máquinas síncronas capazes de injetar potência ativa e de injetar e absorver potência reativa Q. As turbinas a gás são exemplos dessa configuração.
4. GD com injeção de (P) e absorção de (Q): os geradores de indução usados em parques eólicos se enquadram nesse tipo de GD, eles são capazes de injetar potência ativa enquanto absorvem potência reativa.

### 3.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A geração de energia solar vem crescendo de forma significativa nos últimos anos, amplamente utilizada em escala mundial (KARIMI et al., 2016). É gerada a partir de painéis fotovoltaicos (PF) dependentes da irradiação solar. A conexão no SDEE é realizada por meio de inversores, cuja função é converter a energia CC (Corrente Contínua) gerada pelos painéis fotovoltaicos em energia CA (Corrente Alternada) aplicada na fonte de alimentação (ELTAWIL; ZHAO, 2010). A capacidade de produção de energia e corrente via PF está diretamente ligada com a intensidade da luz solar e do modelo dos PFs (XUAN; BIN, 2008).

A instalação de usinas fotovoltaicas no Brasil expandiu de forma significativa nos últimos anos. Na Figura 3 apresenta-se o crescimento das unidades instaladas por trimestre nos anos de 2018 e 2019 (1º trimestre).

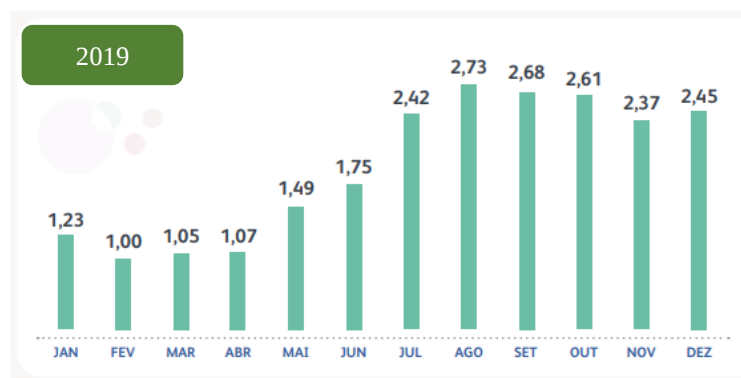
Figura 3 - Crescimento da energia solar fotovoltaica no Brasil.



Fonte: Adaptado de ANEEL (2019).

### 3.3 ENERGIA EÓLICA

A aplicação do vento para geração de energia elétrica tem crescido de forma exponencial pelo mundo nos últimos anos. As preocupações ambientais, voltadas para emissões de gases de efeito estufa e a diversificação da matriz energética, potencializaram um grande incentivo para tal modalidade de geração de energia na década de 1990, onde o mercado concentrou-se na Europa, tanto em termos de instalações quanto em fabricantes (EPE, 2016). A partir da metade dos anos 2000 a energia eólica já estava difundida pelo mundo, chegando à década de 2010 como uma energia renovável de suma importância para redução das emissões de gases de efeito estufa. A geração eólica pode ser dividida em duas categorias de acordo com a localização de

Figura 4 - Emissão de  $CO_2$  evitadas em 2019 (em milhões de toneladas).

Fonte: ABEEólica (2019).

instalação: *onshore* (em terra) ou *offshore* (marítima) (EPE, 2016).

Segundo a associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEOLICA), em 2019 foram evitadas emissões de 22,85 milhões de toneladas de  $CO_2$  conforme mostrado na Figura 4. Esse valor corresponde à emissão anual de aproximadamente 27,7 milhões de automóveis.

O processo de geração de energia eólica é realizado por meio de um aerogerador, cuja função é converter a energia cinética do vento, em energia elétrica. (LAGE; PROCESSI, 2013). Enumeram-se os principais elementos de um aerogerador de acordo com (EPE, 2016):

1. **Rotor:** Conjunto de pás e cubo, cuja função é converter a energia cinética do vento em energia mecânico-motriz.
2. **Eixo:** elo que tem como objetivo transferir a energia mecânico-motriz convertida pelo rotor para o gerador de indução.
3. **Gerador:** converte a energia mecânica em energia elétrica.

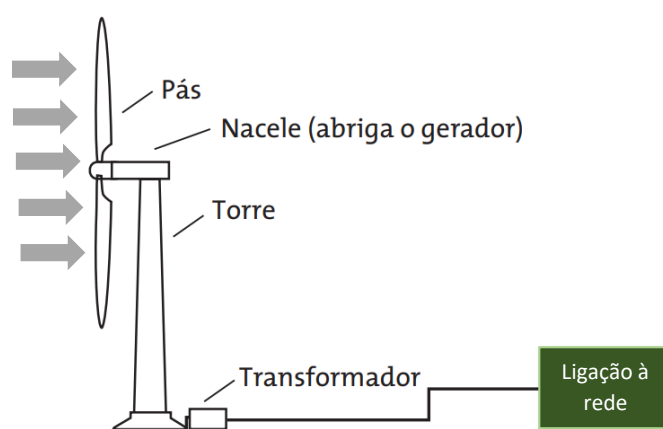
Na Figura 5 é ilustrado um modelo de aerogerador. Os aerogeradores podem ser divididos em duas classes: aerogeradores de eixo horizontal e aerogeradores de eixo vertical; sendo a configuração de eixo horizontal predominante no mundo e no Brasil (LAGE; PROCESSI, 2013). Na Tabela 2 são apresentadas as classificações das turbinas de acordo com o porte.

Tabela 2 - Classificação das turbinas eólicas.

| Classificação | Potência         |
|---------------|------------------|
| Pequeno porte | <10 kW           |
| Médio porte   | 10 kW até 250 kW |
| Grande Porte  | >250 kW          |

Fonte: Adaptado de Lage e Processi (2013).

Figura 5 - Componentes de um aerogerador.



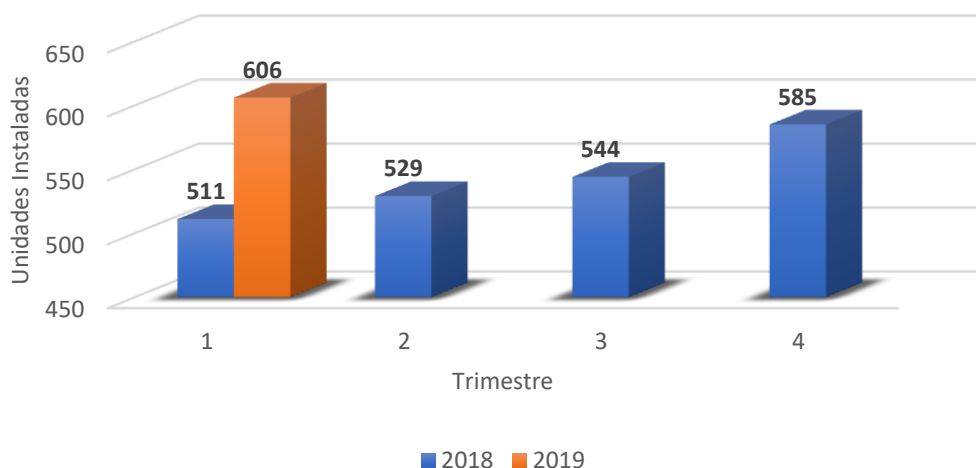
Fonte: Adaptado de Lage e Processi (2013).

A participação do Brasil no mercado eólico mundial ainda é pequena. No entanto, vem apresentando crescimentos significativos na última década em relação à capacidade instalada (LAGE; PROCESSI, 2013). Na Figura 6 apresenta-se o crescimento de unidades eólicas instaladas ao longo dos anos de 2018 e 2019. Na Figura 7 apresenta-se a capacidade instalada. Houve um aumento de 19% de potência instalada no primeiro trimestre de 2019 em relação ao primeiro trimestre de 2018. Com as novas instalações, a fonte de energia eólica atingiu 9,1% de representatividade na matriz energética brasileira em 2019 (ABEEOLICA, 2019).

### 3.4 BIOMASSA

A energia elétrica também pode ser gerada a partir da decomposição de matéria orgânica. O aproveitamento da biomassa para fins energético foi crucial para a evolução humana, onde seu próprio meio de obtenção e uso evoluíram juntos, desde técnicas simples como: lenha recolhida para proteção e aquecimento, até modernas técnicas para geração de calor, força motriz e eletricidade (EPE, 2016; TONHA, 2017). O bagaço de cana é a principal biomassa aplicada

Figura 6 - Crescimento da energia eólica no Brasil.



Fonte: adaptado de ANEEL (2019).

na geração de energia elétrica conforme mostrado na Tabela 3. O crescimento da participação no cenário nacional, pode ser justificado em razão das instalações da indústria de Etanol e açúcar em solo nacional. A bioeletricidade é adquirida principalmente por meio da cogeração (geração combinada de energia elétrica e energia térmica) em unidades de segmentos industriais sucroenergética. A partir dos anos 2000 o crescimento da bioeletricidade elevou-se em razão da expansão do aproveitamento do bagaço da cana-de-açúcar e incentivos federais como o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) que fomentou a participação da bioeletricidade na matriz nacional de energia (EPE, 2016).

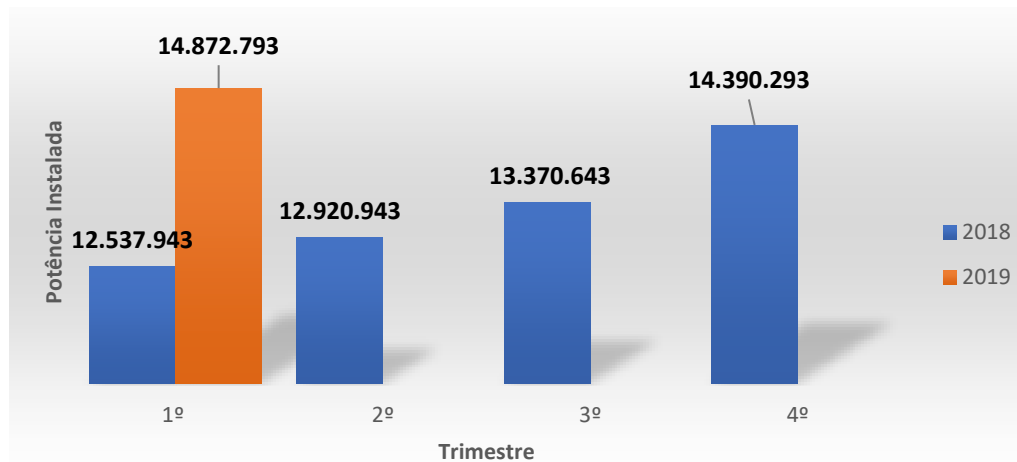
Na Figura 8 apresenta-se o número de usinas termelétricas instaladas, no qual, as do tipo Biomassa contém o segundo maior número de unidades instaladas no primeiro trimestre de 2019.

Na figura 9 são mostrados as potências instaladas das termelétricas no primeiro trimestre de 2019. A biomassa contém a maior potência instalada em relação as demais técnicas de geração de energia.

### 3.5 HIDRÁULICA

Nessa categoria enquadram-se as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's) e as Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH's) que utilizam os recursos hídricos para produção de energia elétrica, onde são aplicadas turbinas hidráulicas acopladas a geradores de eletricidade (POLIZEL, 2007). O aproveitamento hidroelétrico é realizado com características simplificadas,

Figura 7 - Capacidade instalada energia eólica em 2018 e 2019.



Fonte: adaptado de ANEEL (2019).

comparado com as grandes Usinas Hidrelétricas de Energia (UHE). O nível de simplificação permite viabilizar de forma ágil a expansão de geração e consequentemente redução da crescente demanda de energia (BRAGA JR, 1999). Segundo a resolução nº 652 de 2003 da ANEEL, para o aproveitamento hidrelétrico na condição de PCH a potência instalada deve ser superior a 1.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW, destinado a produção independente, autoprodução, ou produção autônoma com reservatório inferior a 3,0 km (ANEEL, 2003).

Na Tabela 4, são apresentados os números de instalações de PCH's e CGH's e as respectivas potências instaladas. Esse tipo de geração normalmente opera com máquinas rotativas: Geradores de indução ou síncronos. Geradores de indução em PCHs são mais raros. A maioria absoluta utiliza geradores síncronos.

### 3.5.1 Princípio de Funcionamento e Estrutura PCH

A energia hidráulica refere-se a um processo de conversão de energia gravitacional, iniciado no fluxo da água via condutos forçados. A turbina transforma a energia hidráulica em energia mecânica, e esta, é convertida em energia elétrica por meio de um gerador. A energia gerada é fornecida à demanda através de linhas de interligação. A energia hidráulica pode ser obtida por meio de (1) (FLÓREZ, 2014).

$$E_H = H_{est} G \quad (1)$$

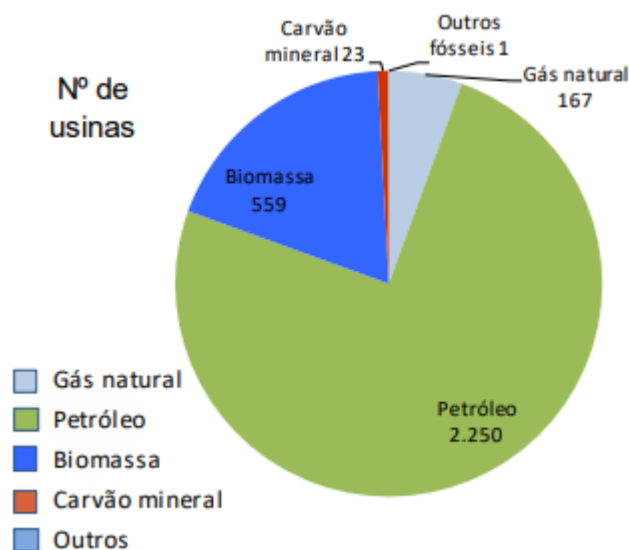
A  $H_{est}$  corresponde à altura estática, que pode ser obtida por meio de (2):

Tabela 3 - Instalações de termelétricas- Biomassa.

|                          | <b>Biomassa</b>     | <b>Quantidade</b> | <b>Potência Instalada</b> | <b>%</b> |
|--------------------------|---------------------|-------------------|---------------------------|----------|
| Agroindustriais          | Bagaço de cana      | 404               | 11.264.992                | 27,3     |
|                          | Biogás              | 3                 | 7.951                     | 0,0      |
|                          | Capim Elefante      | 2                 | 31.700                    | 0,1      |
|                          | Casca de arroz      | 12                | 45.333                    | 0,1      |
| Biocombustíveis líquidos | Etanol              | 1,0               | 320                       | 0,0      |
|                          | Óleos vegetais      | 2                 | 4.350                     | 0,0      |
| Floresta                 | Carvão vegetal      | 8                 | 43.197                    | 0,1      |
|                          | Gás do alto forno   | 12                | 127.705                   | 0,3      |
|                          | Lenha               | 5                 | 36.015                    | 0,1      |
|                          | Licor Negro         | 18                | 2.542.616                 | 6,2      |
|                          | Resíduos Florestais | 56                | 427.697                   | 1        |
| Resíduos animais         | Biogás-Ra           | 14                | 4.487                     | 0,0      |
| Resíduos solos Urbanos   | Biogás-Ru           | 20                | 133.128                   | 0,3      |
|                          | Carvão-Ru           | 2                 | 5.250                     | 0,0      |

Fonte: ANEEL (2019).

Figura 8 - Número de instalações de usinas termelétricas.



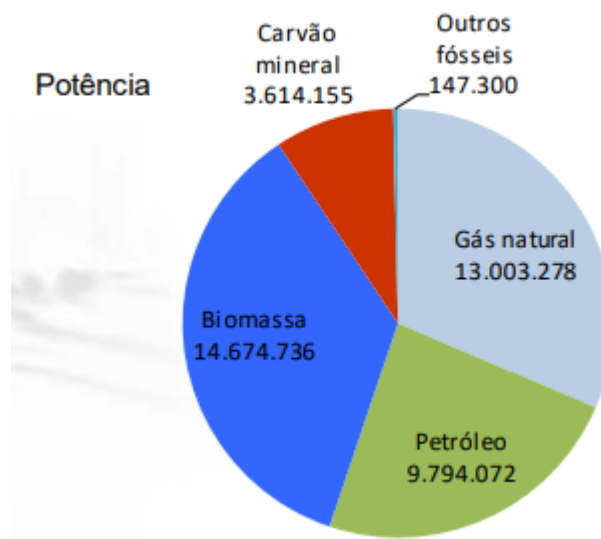
Fonte: ANEEL (2019).

Tabela 4 - Instalação de unidades PCHs e CGHs e potência instalada.

| <b>Tipo</b>                        | <b>Quantidade</b> | <b>% Total</b> | <b>Potência Instalada kW</b> | <b>% Total</b> |
|------------------------------------|-------------------|----------------|------------------------------|----------------|
| Pequena Central Hidrelétrica -PCH  | 426               | 5.7%           | 5.183,756                    | 3.1%           |
| Central Geradora Hidrelétrica -CGH | 698               | 9.4%           | 708.002                      | 0.4%           |

Fonte: ANEEL (2019).

Figura 9 - Potências instaladas (kW) em usinas termelétricas.



Fonte: ANEEL (2019).

$$H_{est} = Z_{NS} - Z_{NI} \quad (2)$$

Sendo:

*NS*: nível superior;

*NI*: nível inferior

*G*: peso da água

Uma PCH, dependendo de sua estrutura, pode ser composta pelos seguintes elementos (BRAGA JR, 1999):

- **Barragem**: reservatório cuja finalidade é regularizar o nível d' água e aumentar o desnível;
- **Vertedouro**: controla o nível de água na barragem impedindo que a mesma contenha água em excesso;
- **Tomada de água**: capta a água e impede que partículas sólidas adentrem no sistema hidráulico;
- **Canal de adução**: conduz a água em direção à turbina;
- **Tubulação forçada**: conduz a água sob pressão para a turbina;

- **Turbina hidráulica:** é capaz de converter a energia hidráulica portata pelo fluído ou pela água (energia cinética, energia potencial gravitacional e energia de pressão) em energia mecânico-motriz;
- **Geradores de eletricidade:** é responsável por aplicar a energia mecânica do eixo e transformá-la em energia elétrica;

### 3.5.2 Gerador Síncrono

O gerador síncrono é uma máquina elétrica rotativa cuja função é transformar energia mecânica rotativa em energia elétrica CA (Corrente Alternada). Geralmente, fornecem tensão, potência ativa e reativa estáveis e baixos índices de distorção harmônica. Essas máquinas tendem a se comportar como fontes de tensão constante, em razão do seu projeto eletromagnético, e fontes de frequências estáveis devido à inércia rotacional acionada à massa mecânica. Eles podem fornecer corrente de curto-circuito alta quando ocorre uma falta no sistema elétrico de potência por causa da inércia (IEE, 2013; TONHA, 2017).

Neste trabalho aplica-se as GDs do tipo PCHs que utilizam geradores síncronos. Esse tipo de GD possuem uma geração fixa quando comparado com técnicas como geração solar fotovoltaica e eólica que dependem totalmente das condições climáticas.

## 4 CURTOS-CIRCUITOS

O SEP está continuamente sujeitos às ocorrências que geram perturbações no seu estado normal, provocando alterações em grandezas elétricas como: corrente, tensão, frequência e potências. Essas alterações podem provocar sérias violações nas restrições operativas do sistema, no qual a integridade de equipamentos e instalações é comprometida (SATO; FREITAS, 2015).

Em geral, os curtos-circuitos são as perturbações mais comuns e as mais severas, e podem ser gerados a partir do rompimento do isolamento entre as fases ou entre a fase e terra. Os quatro principais tipos de curtos-circuitos que podem ocorrer no sistema elétrico são: monofásico com conexão com a terra, bifásico com conexão com a terra, bifásico, e trifásico com conexão com a terra.

### 4.1 TIPOS DE CURTOS-CIRCUITOS

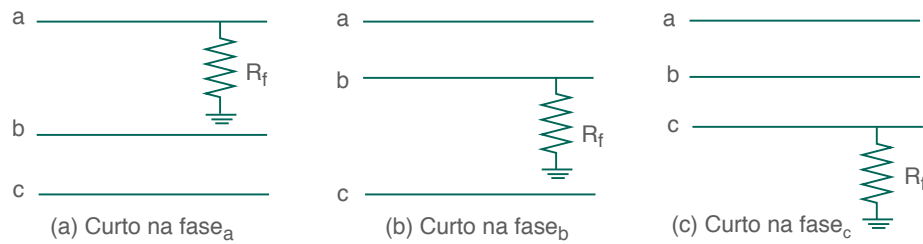
As faltas que ocorrem no sistema de distribuição de energia elétrica podem ser classificadas em dois tipos: faltas desequilibradas (assimétricas) e faltas equilibradas (simétricas). Essas faltas também podem ser categorizadas como: faltas em série ou *shunt* (GURURAJAPATHY et al., 2017).

#### 4.1.1 Curto-Circuito Monofásico com conexão com a terra

A falta fase-terra é caracterizada quando uma das LTs entra em contato com o fio terra ou neutro. Podem ser geradas por fatores como: ventania, queda de árvore, ou qualquer outro incidente. Esse tipo de falta representa 70% das faltas que ocorrem na rede (GURURAJAPATHY et al., 2017; GONEN, 2014). Na Figura 10 são ilustrados os tipos de curtos-circuitos monofásicos com conexão com a terra.

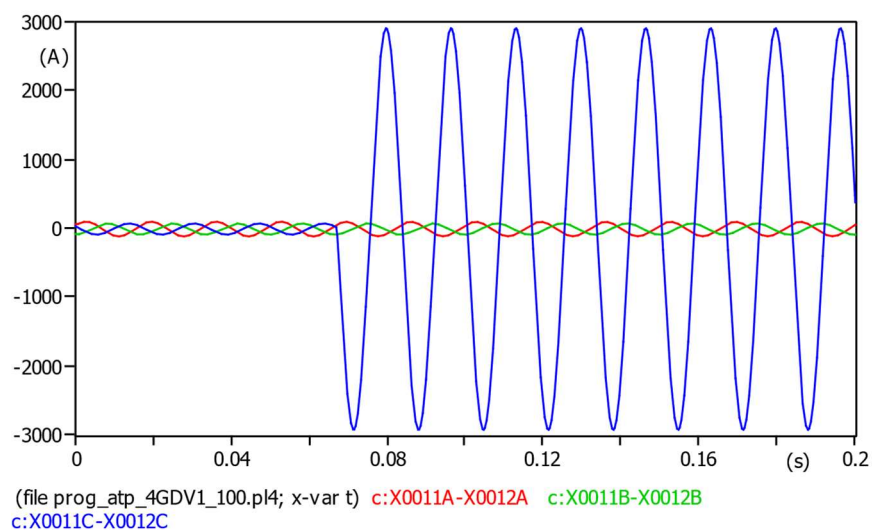
Na Figura 11 apresenta-se o comportamento das formas de ondas das corrente trifásicas, no qual aplicou-se um curto-circuito monofásico na fase C que ocorre no instante 66ms.

Figura 10 - Curto-circuito monofásico com conexão com a terra: (a) curto na fase a (b) curto na fase b, e (c) curto na fase c.



Fonte: adaptado de Gururajapathy et al. (2017).

Figura 11 - Curto-circuito monofásico fase (c).



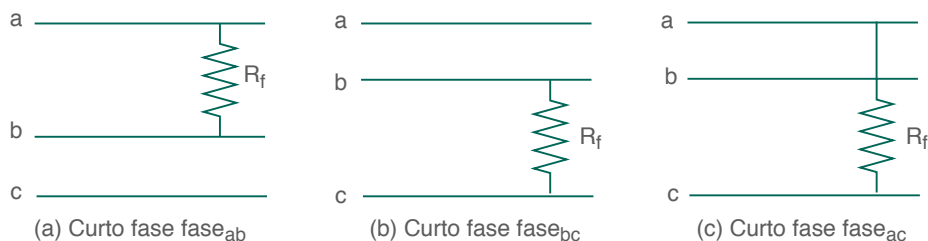
Fonte: elaboração da própria autora.

#### 4.1.2 Curto-circuito Bifásico

A falta fase-fase, apresentada na Figura 12, pode ocorrer em sistemas de transmissão aéreos ou subterrâneos em decorrência de ventos fortes, ou quando dois condutores estão em curto-circuito. Esse tipo falta representa 15% das perturbações que ocorrem na rede de distribuição (GURURAJAPATHY et al., 2017; GONEN, 2014).

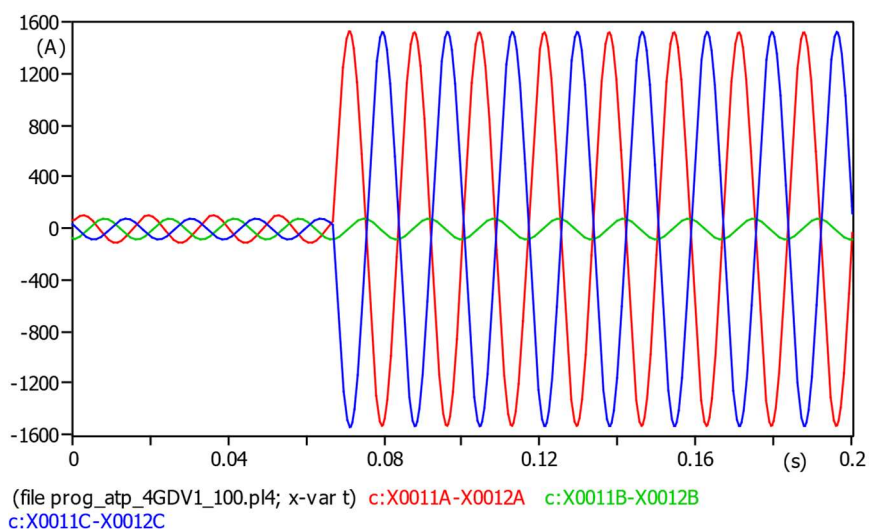
Na Figura 13 apresenta-se o comportamento as formas de ondas de corrente para um curto-circuito entre as fases A e C.

Figura 12 - Curto-Circuito bifásico: (a) fases a e b, (b) fases b e c e (c) fases a e c.



Fonte: adaptado de Gururajapathy et al. (2017).

Figura 13 - Curto-circuito bifásico entre as fases (a) e (c).

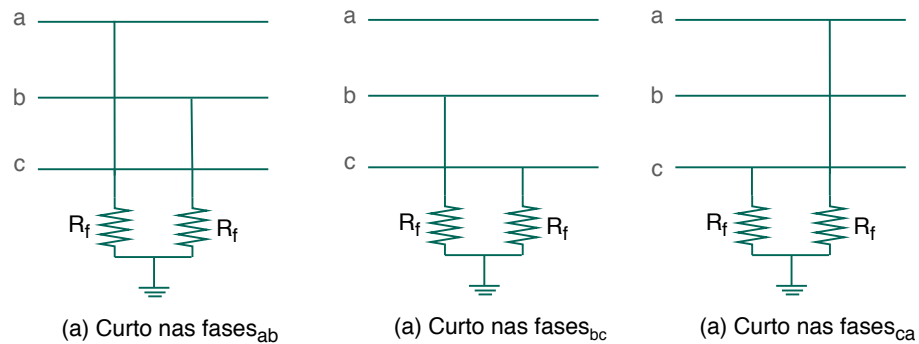


Fonte: elaboração da própria autora.

#### 4.1.3 Curto-circuito bifásico com conexão com a terra

Esse tipo de curto-circuito, ilustrado na Figura 14, representa 10% das ocorrências, e ocorrerá quando uma árvore em queda conectar duas fases à terra. Trata-se de uma falta séria que resulta em uma assimetria significativa, se não for eliminada, pode resultar em curto-circuito trifásico (GURURAJAPATHY et al., 2017; GONEN, 2014).

Figura 14 - Curto-circuito bifásico com conexão à terra: (a) fases a e b, (b) fases b e c, e (c) fases a e c.

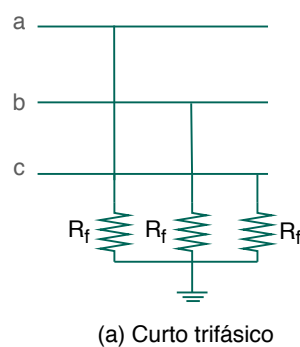


Fonte: adaptado de Gururajapathy et al. (2017).

#### 4.1.4 Curto-circuito trifásico com conexão com à terra

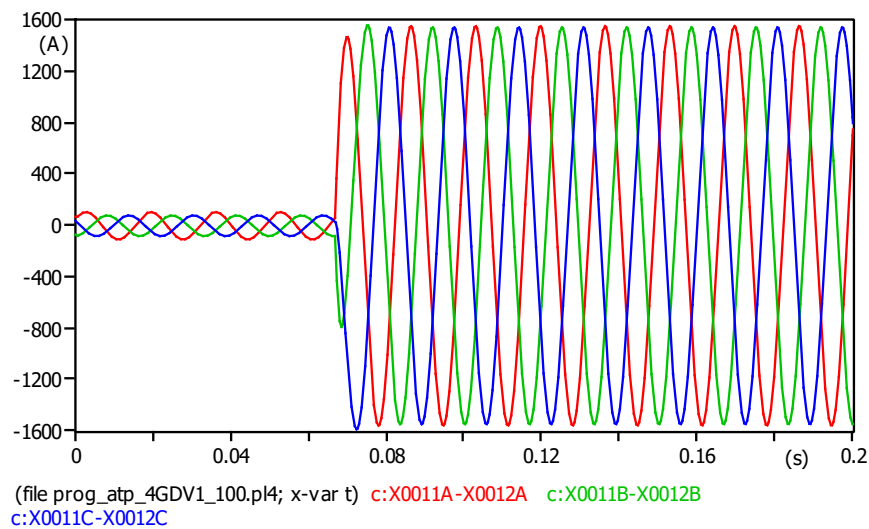
Também caracterizado como falta simétrica, o curto-circuito trifásico apresentado na Figura 15 possui característica como: nível de tensão igual a zero e corrente de falta muito elevada. Pode ocorrer em razão de falhas em equipamentos, torre caída ou uma linha conectando as fases. Embora, represente apenas 5% das ocorrências no sistema, é de longe o curto-circuito mais analisado em razão de sua gravidade (SATO; FREITAS, 2015; GURURAJAPATHY et al., 2017).

Figura 15 - Curto-circuito trifásico com conexão terra.



Fonte: adaptado de Gururajapathy et al. (2017).

Figura 16 - Curto-circuito trifásico.



Fonte: elaboração da própria autora.

Na Figura 16 apresenta-se o comportamento as formas de ondas de corrente para um curto-circuito trifásico.

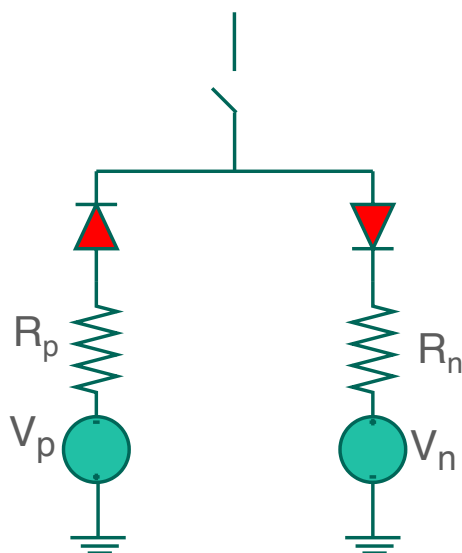
## 4.2 FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA

Caracteriza-se FAI como condições anormais não detectadas pelos sistemas de proteção convencionais, devido à baixa corrente de falta, gerada em razão de sua alta impedância. Na grande maioria, as FAIs ocorrem em razão do rompimento de um condutor aéreo, que toca superfícies de alta impedância como: estrada de asfalto, areia, cimento ou árvore (ZANJANI et al., 2012).

Diferentemente dos curtos-circuitos de baixa impedância, que envolvem correntes de falta elevadas e são facilmente detectados pelo sistema de proteção. As FAIS não ocasionam danos relevantes aos equipamentos do sistema elétrico (WESTER, 1998). No entanto, quando objetos vizinhos entram em contato com os condutores nus e energizados da linha representam perigo à vida humana (ZANJANI et al., 2012).

Ao longo dos anos diversos modelos de FAI foram propostos na literatura. Neste trabalho aplica-se um modelo simplificado de diodos de acordo com (SHILLER, 1990; LAI et al., 2006) baseado em arco em solo arenoso conforme mostrado na Figura 17. O modelo é composto por duas fontes  $CC - V_p$  e  $V_n$ , que representam a tensão inicial do ar no solo ou entre as árvores e a linha de distribuição.  $R_p$  e  $R_n$  representam a resistência de falta.

Figura 17 - Modelo FAI.



Fonte: adaptado Lai et al. (2006).

## 5 TRANSFORMADA WAVELET

A transformada *Wavelet* (TW) é uma ferramenta matemática utilizada para análise de sinais (DAUBECHIES, 1992). O sinal pode ser decomposto em várias escalas, com diferentes níveis de resolução, partindo de uma função inicial denominada *Wavelet* mãe. Uma das principais vantagens das *Wavelets* é a capacidade de realizar análises locais do sinal no domínio do tempo e frequência, isto é, analisar uma determinada área localizada dentro de um sinal maior diferentemente da Transformada de Fourier (TF) que fornece somente uma análise global do sinal (MISITI et al., 2004).

A TW engloba um conjunto infinito de *wavelets* em razão da necessidade de uma análise multirresolução. A partir de uma *wavelet* mãe, na qual, variando-se os fatores de escala e translação, é possível gerar grandes números de *wavelets* filhas. Existem diversos tipos de *wavelets* mãe como: Haar, Symmlet (sym), Daubechies (db), Morlet etc. As *wavelets* da família Daubechies (DAUBECHIES, 1992) tem sido amplamente aplicadas e adequadas em sistemas de energia, em razão de suas habilidades para detectar sinais de baixa amplitude, curta duração, decaimento rápido, e tipos de sinais oscilantes, características comumente encontradas nos sistemas de energia elétrica (KIM; AGGARWAL, 2000).

### 5.1 TRANSFORMADA WAEVELT CONTÍNUA (TWC)

A Transformada *Wavelet* Contínua (TWC) pode ser definida como a soma ao longo de todo tempo do sinal, no qual é multiplicado por versões escalonadas e deslocadas da função *Wavelet* ( $\psi$ ) (MISITI et al., 2004). Portanto, a TWC de um determinado sinal  $f(t)$  com uma respectiva *wavelet* mãe ( $\psi$ ) em qualquer fator de escala  $a$  e translação  $b$  pode ser obtida de acordo com (3) (KIM; AGGARWAL, 2000; MALLAT, 2009).

$$TWC(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

Onde  $a$  é o fator de dilatação ou escala;  $b$  fator de translação, ambas variáveis são contínuas. Por meio de (3) nota-se que o sinal unidimensional original no domínio do tempo  $f(t)$  é estruturado para um novo espaço bidimensional baseado no fator de escala  $a$  e translação  $b$  pela TW (KIM; AGGARWAL, 2000). Vale ressaltar, que escalas mais elevadas representam *wave-*

*lets* mais "esticadas". Quanto mais esticado as *wavelets* maior a parcela do sinal com o qual está sendo comparado, desse modo, características grosseiras do sinal são medidas pelos coeficientes da *wavelet*. Assim, existe uma conexão entre escalas de *wavelet* e frequência, conforme revelado pela análise *wavelet* (MISITI et al., 2004):

- Baixo fator de escala  $a$ : *wavelet* comprimida; detalhes sofrem alteração rapidamente; Alta frequência;
- Alto fator de escala  $a$ : *wavelet* esticada, mudança lenta, características grosseiras e baixa frequência.

Os coeficientes *wavelet* com altas amplitudes são capazes de detectar e medir curtas variações de alta frequência, devido a boa localização no tempo. Em baixas frequências a resolução é inferior, no entanto, eles possuem uma resolução de frequência melhor (MALLAT, 2009).

## 5.2 TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA (TWD)

A TW pode operar em tempo contínuo (em funções) e em tempo discreto (vetores). Em tempo discreto resolve-se um sistema linear, enquanto em tempo contínuo o sistema contém integrais de  $f(t)$  e tempo  $W_{jk}(t)$  (STRANG; NGUYEN, 1996). A Transformada *Wavelet* Discreta (TWD) origina-se da discretização dos parâmetros  $a$  e  $b$ , no qual, a discretização do parâmetro de translação  $b$  está diretamente ligada com a escala da *wavelet* mãe. A TWD de um determinado sinal, pode ser obtida de acordo com (4) (KIM; AGGARWAL, 2000).

$$TWD(m, k) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_n x(n) \psi\left(\frac{k-b}{a}\right) \quad (4)$$

Sendo:

$\psi$  : *wavelet* mãe ;

$a$  : fator de escala ou conversão;

$b$  : fator de translação.

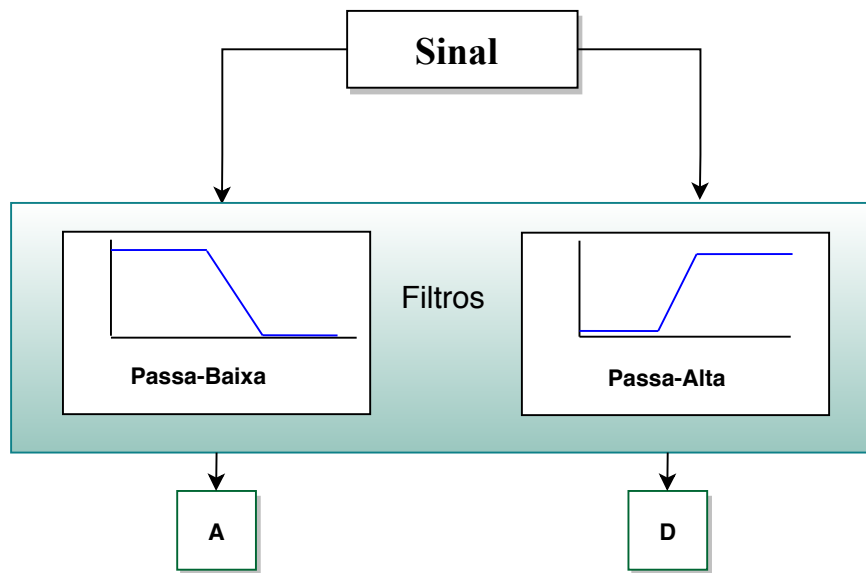
$k$  : número específico de amostras de um sinal de entrada;

Os parâmetros de escala e translação (como apresentado na equação 3) são funções de um parâmetro inteiro  $m$ , portanto,  $a = a_0^m$  e  $b = nb_0 a_0^m$ , gerando uma família de *wavelets* filha.

### 5.3 ANÁLISE MULTIRRESOLUÇÃO

A Análise Multirresolução (AMR) (MALLAT, 1989) refere-se ao processo de decomposição do sinal em vários níveis de resolução, por meio dos quais, obtêm-se os coeficientes de detalhe e de aproximação. As aproximações contêm os componentes de alta escala e baixa frequência do sinal produzido pelo processo de filtragem, realizado por meio do filtro passa-baixa ( $h$ ). Os coeficientes de detalhe fornecem os componentes de baixa escala e altas frequências, produzidos pelo processo de filtragem do sinal por um filtro passa-alta ( $g$ ) conforme ilustrado na Figura 18 o sinal original ( $S$ ) passa por dois filtros, e surge como dois sinais (MISITI et al., 2004; EL-ZONKOLY, 2011).

Figura 18 - Processo de decomposição do sinal.



Fonte: adaptado de Misiti et al. (2004).

Os coeficientes de aproximação gerados a partir do filtro passa baixa ( $h$ ) podem ser obtidos via (6), enquanto os coeficientes de detalhe produzidos pelo filtro passa alta ( $g$ ) são obtidos via (7). Esses coeficientes são calculados por meio de um processo de convoluções e subamostras discretas, denotadas  $\tilde{x}[n] = x[-n]$  e obtidos via (5) (MALLAT, 2009).

$$\tilde{x}[n] \begin{cases} x[p] & \text{if } n = 2p \\ 0 & \text{if } n = 2p + 1 \end{cases} \quad (5)$$

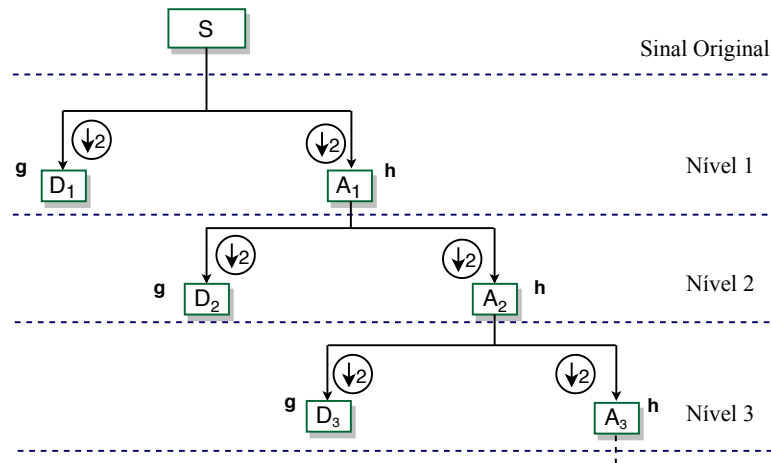
$$a_{j+1}[p] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} h[n-2p]a_j[n] \quad (6)$$

$$d_{j+1}[p] = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} g[n-2p]a_j[n] \quad (7)$$

Sendo  $p$  momento de desaparecimento. Os coeficientes  $a_{j+1}$  e  $d_{j+1}$  são calculados incluindo todas as amostras de convolução de  $a_{j+1}$  com  $h$  e  $g$  respectivamente. As altas frequências da sequência interna de  $a_{j+1}$  são removidas por meio do filtro  $\bar{h}$ , enquanto as altas frequências restantes são coletadas via filtro passa alta  $g$  (MALLAT, 2009).

O processo de decomposição em multirresolução é ilustrado na Figura 19, no qual,  $h$  e  $g$  são os filtros passa baixa e passa alta, respectivamente.  $D_j$  e  $A_j$  são os coeficientes de detalhe e aproximação no nível de resolução  $j$ , para  $j = 1, 2, 3, \dots, J$ .

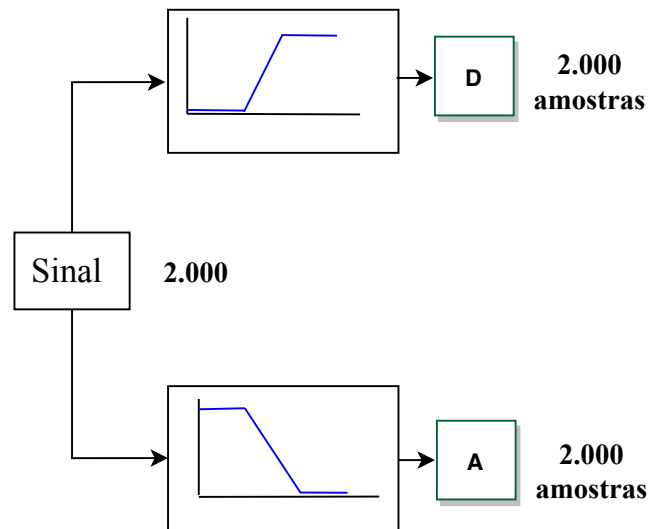
Figura 19 - Decomposição do sinal em vários níveis.



Fonte: adaptado de Kim e Aggarwal (2001).

No processo de filtragem de um sinal digital original, o tamanho dos dados torna-se duas vezes maior em relação aos dados iniciais. Supondo-se que um sinal original ( $S$ ) formado por 2.000 sinais de amostras, passa pelos filtros complementares de acordo com a Figura 20, os sinais resultantes conterão 4.000 amostras. Sendo 2.000 amostras formadas pelos coeficientes de detalhe  $D_j$  e 2.000 pelos coeficientes de aproximação  $A_j$  (MISITI et al., 2004).

A decomposição do sinal via *wavelets* pode ser realizado de uma forma mais simplificada. Para isso, introduz-se um operador *downsampling* cujo objetivo é reduzir o número de amostra-

Figura 20 - Processo de filtragem sem *downsampling*.

Fonte: adaptado de Misiti et al. (2004).

gem de saída dos filtros separados. Dessa forma, armazena-se somente os componentes pares, enquanto os números ímpares são removidos das duas saídas (STRANG; NGUYEN, 1996; DELMONT FILHO, 2007). Na figura 21 é apresentado o processo de filtragem com a atuação do operador *downsampling* denotado por  $\downarrow$ .

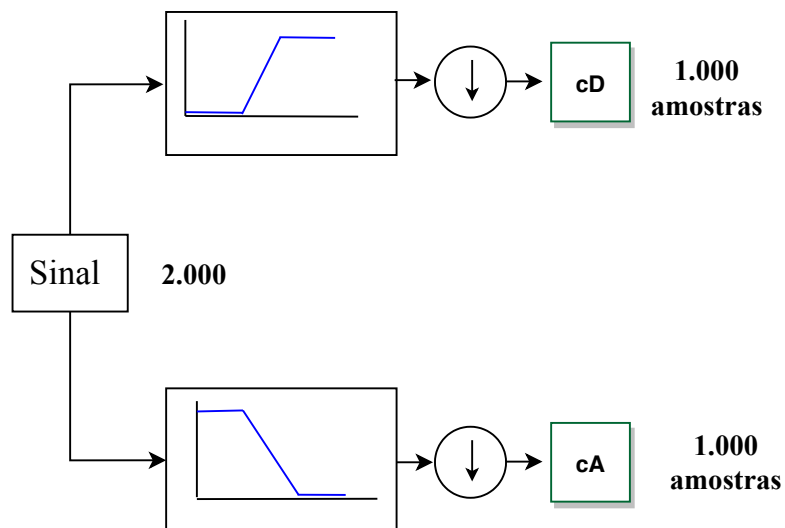
Para melhor visualização, ilustra-se o processo de decomposição de um sinal real formado por 1.000 amostras de sinais (Figura 22) aplicando a TWD, no qual, a *wavelet* (db2) é utilizada para análise. O sinal utilizado é uma senoide com ruídos de alta frequência.

Por meio da Figura 23 é possível notar que os coeficientes de aproximação (cA) contém menos ruído que o sinal original, enquanto os coeficientes de detalhe são menores e consistem principalmente de um ruído de alta frequência (MISITI et al., 2004).

## 5.4 FILTROS

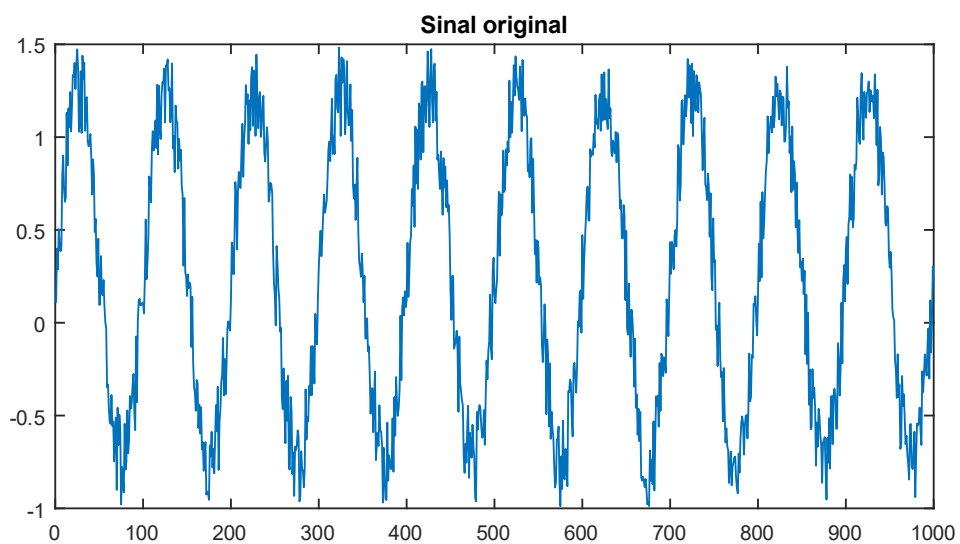
### 5.4.1 Haar

A *wavelet* Haar pode ser obtida por meio de uma análise multirresolução de funções constantes por parte conforme (8) e (9). A função de escala é definida como:  $\Phi = 1_{[0,1]}$ , o filtro  $h[n]$  possui dois coeficientes não nulos iguais a  $2^{-1/2}$  em  $n = 1$  e  $n = 0$ , desse modo (MALLAT, 2009):

Figura 21 - Processo de filtragem com *downsampling*.

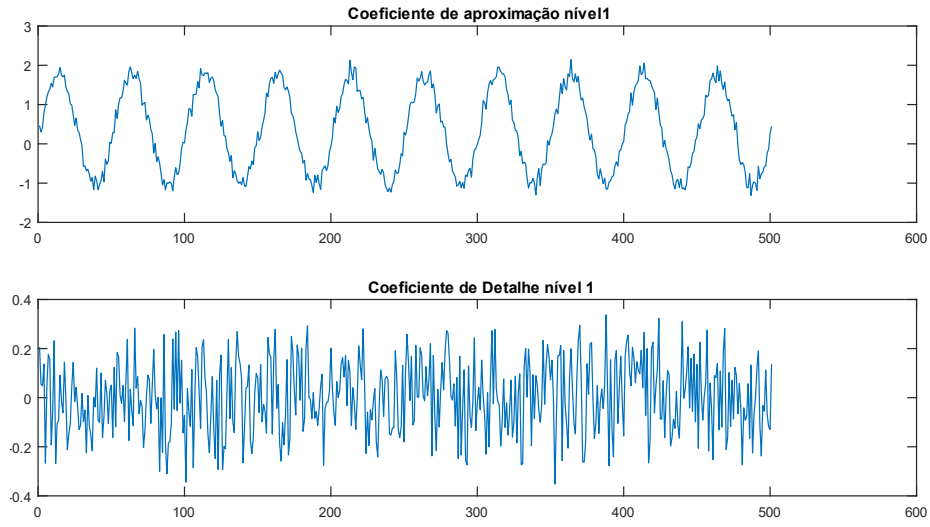
Fonte: adaptado de Misiti et al. (2004).

Figura 22 - Sinal original.



Fonte: adaptado de Misiti et al. (2004).

Figura 23 - Coeficientes de aproximação e detalhe.



Fonte: adaptado de Misiti et al. (2004).

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\psi\frac{t}{\sqrt{2}} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} (-1)^{1-n}h[1-n]\phi(t-n) = \frac{1}{\sqrt{2}}(\phi(t-1) - \phi(t)), \quad (8)$$

Portanto:

$$\Psi(t) = \begin{cases} -1 & \text{se } 0 \leq t < \frac{1}{2} \\ 1 & \text{se } \frac{1}{2} \leq t < 1 \\ 0 & \text{Caso contrário} \end{cases} \quad (9)$$

#### 5.4.2 Daubechies

A implementação das *wavelets* da família Daubechies formadas por um conjunto de bases ortogonais com suporte compacto (DAUBECHIES, 1988), viabilizou a análise de sinais discretos. São denotadas por dbN, no qual  $N$  representa a ordem da *wavelet* mãe (MISITI et al., 2004). Uma determinada *wavelet*  $\psi$  com  $p$  momentos, que gera uma base ortonormal  $L^2$  contém um suporte de tamanho  $[2p - 1]$ . O tamanho mínimo do suporte de uma *wavelet* dbN pode ser definido como  $[-p + 1, p]$ . O suporte correspondente da função de escala  $\phi$  é  $[0, 2p - 1]$  (MALLAT, 2009).

## 5.5 TRANSFORMADA WAVELET DISCRETA DE SOBREPOSIÇÃO MÁXIMA (MODWT)

A transformada *Wavelet* Discreta de Sobreposição Máxima (MODWT) trata-se de uma versão modificada da TWD (PERCIVAL; WALDEN, 2000). A análise de multirresolução que é uma decomposição aditiva baseada em escala, pode ser realizada tanto na TWD quanto na MODWT. Diferentemente da TDW a MODWT não possui o filtro *downsampling* que elimina metade do conjunto de amostra no processo de decomposição dos sinais (ZHU et al., 2014).

A definição da MODWT pode ser obtida diretamente da TWD. Seja os filtros passa-baixa ( $h_{jl}$ ) e passa-alta ( $g_{jl}$ ) pertencentes a TWD, sendo  $l = 1, \dots, L$  o comprimento do filtro e  $j$  o nível de decomposição do sinal. Os filtros de escala e *wavelet* da MODWT são equivalentes aos filtros TWD por meio de (10) e (11) (PERCIVAL; WALDEN, 2000; ZHU et al., 2014):

$$\tilde{h}_l = \frac{h_l}{\sqrt{2}} \quad (10)$$

$$\tilde{g}_l = \frac{g_l}{\sqrt{2}} \quad (11)$$

Dessa forma, os coeficientes MODWT do nível  $j$  são definidos como a convolução da série temporal  $X(n)$  apresentado em (12) e (13) (PERCIVAL; WALDEN, 2000; UPADHYAYA; MOHANTY, 2016):

$$\tilde{W}_{1,n} = \sum_{l=0}^{L_1-1} \tilde{h}_l X_{n-l} \mod N \quad (12)$$

$$\tilde{V}_{1,n} = \sum_{l=0}^{L_1-1} \tilde{g}_l X_{n-l} \mod N \quad (13)$$

Sendo  $n = 1, 2, 3, \dots, N$  e  $N$  é o tamanho da amostra de sinais. Por meio da expressão acima, nota-se que em cada nível de decomposição os coeficientes *Wavelets* da MODWT terão o mesmo comprimento do sinal original  $X$ .

Os coeficientes de Detalhes  $\tilde{D}_j$  e Aproximação  $\tilde{A}_j$  da  $n$ -ésima amostra e do  $j$ -ésimo estágio da MODWT podem ser obtidos via (14) e (15) (UPADHYAYA; MOHANTY, 2016):

$$\tilde{A}_{1,n} = \sum_{l=0}^{L_1-1} \tilde{g}_{j,l}^0 \tilde{V}_{1,n+l} \mod N \quad (14)$$

$$\tilde{D}_{1,n} = \sum_{l=0}^{L_1-1} \tilde{h}_{j,l}^0 \tilde{W}_{1,n+l} \bmod N \quad (15)$$

## 6 TEORIA DA RESSONÂNCIA ADAPTATIVA

A Teoria da Ressonância Adaptativa ou *Adaptive Resonance Theory* (ART) introduzida por Grossberg (1976) propõe uma solução para o dilema entre a estabilidade e a plasticidade (CARPENTER; GROSSBERG, 1988). Este dilema é gerado por dois fatores: o primeiro refere-se à dificuldade de inclusão de novos padrões ao processo de aprendizagem por causa da necessidade de reiniciar o processo para que novos padrões sejam apresentados à rede; o segundo está associado à falta de preservação dos conhecimentos anteriormente aprendidos.

A rede ART é uma teoria cognitiva inspirada no funcionamento do cérebro, com algoritmo de treinamento plástico e estável capaz de auto-organizar códigos de reconhecimento em resposta à entrada de padrões arbitrários em tempo real. As redes pertencentes à família ART possuem sistema de aprendizagem supervisionado e não supervisionado e características imprescindíveis como: capacidade de aprendizagem rápida, incremental e estável (MARCHIORI, 2006; GROSSBERG, 2013).

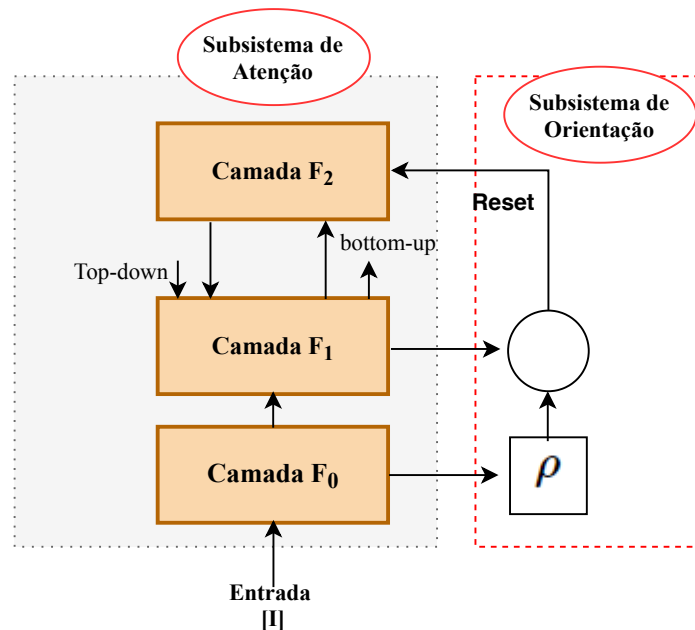
### 6.1 REDE ART

Arquitetura com sistema de aprendizagem não supervisionado capaz de auto-organizar códigos de reconhecimento em tempo real em resposta à sequência de padrões arbitrários de entrada (CARPENTER; GROSSBERG, 1988). As redes ART possuem atributos importantes como: plasticidade e estabilidade, que proporcionam um treinamento rápido e confiável. A plasticidade permite a inclusão de novos padrões sem destruir conhecimentos adquiridos anteriormente, enquanto a estabilidade refere-se ao agrupamento de padrões similares na mesma categoria de reconhecimento que assegura a preservação do conhecimento (CARPENTER; GROSSBERG, 1992; LOPES, 2005).

A estrutura da rede ART é composta por três camadas e dois subsistemas conforme mostrado na Figura 24. A camada  $F_0$  denominada camada de entrada responsável pelo recebimento dos sinais de entrada,  $F_1$  denominada camada de comparação e  $F_2$  é a camada de reconhecimento, que realiza o armazenamento de categorias (*clusters*). As camadas  $F_1$  e  $F_2$  compõem o subsistema de atenção e estão ligadas por um sistema não recorrente (*feedforward*)  $F_1$  a  $F_2$  e recorrente (*feedback*)  $F_2$  a  $F_1$  que contêm pesos responsáveis pelo armazenamento de dados através de um método de escolha de categorias. O subsistema de orientação é controlado pelo

parâmetro de vigilância  $\rho$  que emite um sinal de redefinição para  $F_2$  caso exista incompatibilidade entre os padrões de baixo para cima (*bottom-up*) ou de cima para baixo (*top-down*) em  $F_1$  (CARPENTER; GROSSBERG, 1987; LOPES, 2005; MARCHIORI, 2006).

Figura 24 - Arquitetura da rede neural ART.

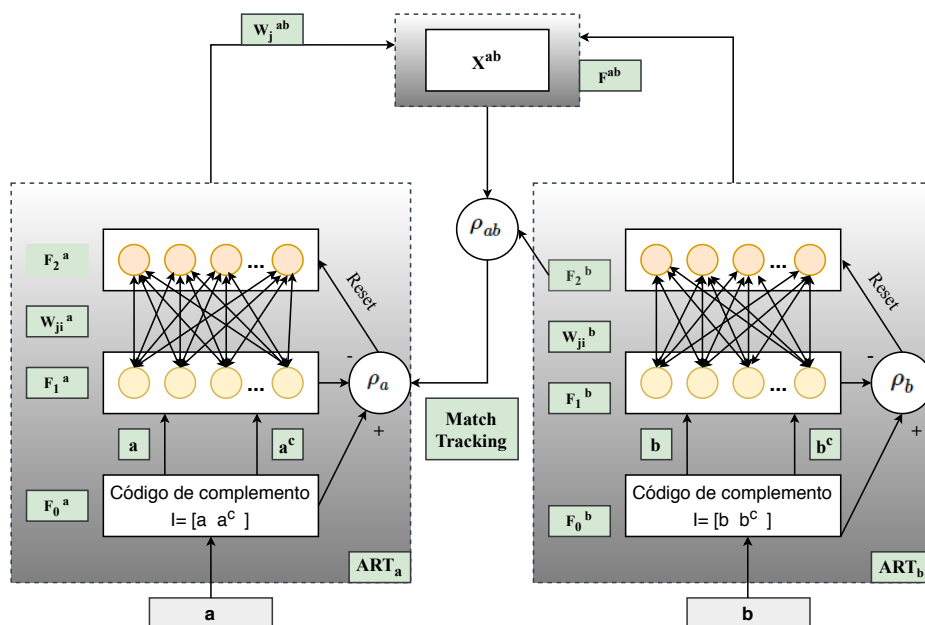


Fonte: adaptado LOPES (2005).

As camadas  $F_1$  e  $F_2$  executam a codificação de padrões de ativação na memória de curto prazo ou *short-term memory* (STM). O sentido de baixo para cima *bottom-up* e de cima para baixo *top-down* incluem sinais de memória adaptativa de longo prazo *long-term memory* (LTM) (CARPENTER; GROSSBERG, 1987).

A seguir apresenta-se as principais redes pertencentes à Teoria da Ressonância Adaptativa.

- **ART<sub>1</sub>**: Vetor padrão de entrada formado por entradas binárias e treinamento não supervisionado (CARPENTER; GROSSBERG, 1987).
- **ART Fuzzy**: Vetor padrão de entrada pode ser composto de dados binários ou analógicos. Essa rede possui treinamento não supervisionado e utiliza um operador AND nebuloso (*Fuzzy*) (CARPENTER et al., 1991b).
- **ARTMAP**: Padrões de entrada binários ou analógicos. Possui treinamento supervisionado e sua estrutura é composta por dois módulos que são interconectados a uma memória associativa denominada inter-ART (CARPENTER et al., 1991a).

Figura 25 - Arquitetura da rede ARTMAP *Fuzzy*.

Fonte: adaptado LOPES (2005).

- **ARTMAP *Fuzzy*:** Possui treinamento supervisionado e de forma auto-organizável. Nessa rede são aplicados os fundamentos da lógica nebulosa (*Fuzzy*) (CARPENTER et al., 1992).

## 6.2 REDE NEURAL ARTMAP *FUZZY*

A rede neural ARTMAP *Fuzzy* (CARPENTER et al., 1992) emprega em seus operadores os cálculos dos conjuntos *Fuzzy* (ZADEH, 1965). Essa rede possui um sistema de aprendizagem supervisionado e auto organizável. Sua estrutura é composta por dois módulos ART:  $ART_a$  e  $ART_b$  que estão conectados por um terceiro módulo denominado inter-ART conforme Figura 25.

Quando uma previsão em  $ART_a$  não é confirmada pelo módulo  $ART_b$  onde estão representadas as respectivas saídas desejadas, o processo *Match Tracking* é ativado por meio da inibição da memória associativa inter-ART. O parâmetro de vigilância do módulo  $ART_a$  tem seu valor aumentado a uma quantidade mínima necessária via processo *Match Tracking* para que a categoria incompatível seja excluída. O sistema iniciará uma nova busca em  $ART_a$ , que levará a ativação de uma categoria que prediz corretamente a saída representada em  $ART_b$ . Esse processo permite maximizar a generalização do código e minimizar o erro preditivo (CARPENTER et al., 1992; CARPENTER; GROSSBERG, 1992; LOPES, 2005).

### 6.3 ALGORITMO DE TREINAMENTO ARTMAP FUZZY

O algoritmo é apresentado de acordo com (CARPENTER; GROSSBERG, 1992; DECANINI et al., 2012):

#### 6.3.1 Dados de Treinamento

Efetua-se a normalização dos vetores de entrada e saída por meio de (16) para evitar a proliferação de categorias.

$$\bar{\mathbf{a}} = \frac{\mathbf{a}}{|\mathbf{a}|} \quad (16)$$

Sendo:

$\bar{\mathbf{a}}$  : vetor de entrada normalizado;

$$|\mathbf{a}| = \sum a_i$$

em seguida faz-se a codificação de complemento via (17) para composição dos vetores de complemento de entrada e saída  $\mathbf{I}^a$  e  $\mathbf{I}^b$  de acordo com (18) e (19).

$$\bar{a}_i^c = 1 - \bar{a}_i \quad (17)$$

$$\mathbf{I}^a = [\bar{\mathbf{a}}\bar{\mathbf{a}}^c] = [\bar{a}_1 \dots \bar{a}_M \dots \bar{a}_1^c \dots \bar{a}_M^c] \quad (18)$$

$$\mathbf{I}^b = [\bar{\mathbf{b}}\bar{\mathbf{b}}^c] = [\bar{b}_1 \dots \bar{b}_M \dots \bar{b}_1^c \dots \bar{b}_M^c] \quad (19)$$

#### 6.3.2 Vetores Pesos

Nessa arquitetura de rede têm-se três pares de vetores pesos de acordo com (20), (21) e (22). Onde  $W_{a(N \times 2Ma)}$  corresponde à rede  $ART_a$ ,  $W_{b(N \times 2Mb)}$  à rede  $ART_b$  e  $W_{((N \times N))}^{ab}$  ao módulo inter-ART, inicialmente os vetores possuem valores iguais a um, indicando que não existem categorias ativas.

$$\mathbf{W}_j^a = (W_{j1}^a, W_{j2}^a \dots W_{j,2Ma}^a) \quad (20)$$

$$\mathbf{W}_k^b = (W_{k1}^b, W_{k2}^b \dots W_{k,2Mb}^b) \quad (21)$$

$$\mathbf{W}_j^{ab} = (W_{j1}^{ab}, W_{j2}^{ab} \dots W_{j,Nb}^{ab}) \quad (22)$$

Sendo:

$M_a$ : Número de elementos do vetor complementar de entrada;

$M_b$ : Número de elementos do vetor complementar de saída;

N: número de padrões de treinamento.

### 6.3.3 Parâmetros

Na Tabela 5 são apresentados os principais parâmetros utilizados na rede neural ARTMAP *Fuzzy*.

Tabela 5 - Principais parâmetros da rede neural ARTMAP *Fuzzy*.

| Parâmetro                                                   | Intervalo | Descrição do Parâmetro                                                                        |
|-------------------------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Parâmetro de escolha ( $\alpha$ )                           | $R^+$     | Responsável pela seleção de categorias                                                        |
| Taxa de treinamento ( $\beta$ )                             | [0,1]     | Controla a velocidade de aprendizagem da rede.                                                |
| Parâmetro de vigilância no módulo ( $\rho_a$ )              | [0,1]     | Controla a ressonância da rede no módulo $ART_a$ .                                            |
| Parâmetro de vigilância no módulo ( $\rho_b$ )              | [0,1]     | Controla a ressonância no módulo $ART_b$ .                                                    |
| Parâmetro de vigilância no módulo inter-ART ( $\rho_{ab}$ ) | [0,1]     | Controla a ressonância no módulo inter-ART.                                                   |
| Constante ( $\epsilon$ )                                    | [0,1]     | Constante utilizada para gerar um acréscimo no parâmetro de vigilância do módulo ( $\rho_a$ ) |

Fonte: elaboração da própria autora.

### 6.3.4 Escolha de Categorias

A escolha de categorias dos módulos  $ART_a$  e  $ART_b$  é obtida via 23 e (24).

$$T_j^a = \frac{|\mathbf{I}^a \wedge \mathbf{W}_j^a|}{\alpha + |\mathbf{W}_j^a|} \quad (23)$$

$$T_j^b = \frac{|\mathbf{I}^b \wedge \mathbf{W}_j^b|}{\alpha + |\mathbf{W}_j^b|} \quad (24)$$

A escolha das categorias ativas é executada conforme (25) e (26).

$$J = \arg\{\max T_j^a, \text{para } j = 1, 2, \dots, N\} \quad (25)$$

$$K = \arg\{\max T_k^b, \text{para } k = 1, 2 \dots N\} \quad (26)$$

Caso exista mais de uma categoria ativa, deve-se escolher aquela que possuir o menor índice. O vetor de atividade do módulo  $ART_b$  é representado por  $Y = [Y_1^b \dots Y_N^b]$  e obtido via (27).

$$Y_K^b = 1 \text{ e } Y_k^b = 0 \text{ } k \neq K \quad (27)$$

### 6.3.5 Ressonância ou *Reset*

O processo de ressonância ocorrerá se (28) e (29) forem satisfeitas; caso contrário, ocorre o processo de *Reset*.

$$\frac{|\mathbf{I}^a \wedge \mathbf{W}_j^a|}{|\mathbf{I}^a|} \geq \rho_a \quad (28)$$

$$\frac{|\mathbf{I}^b \wedge \mathbf{W}_j^b|}{|\mathbf{I}^b|} \geq \rho_b \quad (29)$$

Quando ocorre o *reset*, inicia-se a busca por uma nova categoria ativa nos módulos  $ART_a$  e  $ART_b$  usando-se (25) e (26), respectivamente. Os nós J e K são excluídos. Os valores de  $T_j^a$  e  $T_K^b$  são fixados em ( $T_j^a = 0; T_K^b = 0$ ) para que sejam eliminados do processo de busca. Esse processo é repetido até que seja encontrada uma categoria que satisfaça (28) e (29).

### 6.3.6 *Match-Tracking*

Esse processo é utilizado para verificar se a categoria escolhida no módulo  $ART_a$  é compatível com a saída desejada apresentada no módulo  $ART_b$ ; para isso, (30) deve ser satisfeita.

$$\frac{|\mathbf{Y}^b \wedge \mathbf{W}_j^{ab}|}{|\mathbf{Y}^b|} \geq \rho_{ab} \quad (30)$$

Se o critério de vigilância for satisfeito, o processo de ressonância no módulo  $ART_a$  é confirmado e os pesos são atualizados; caso contrário, é realizado um acréscimo em  $\rho_a$  por meio de (31). Esse acréscimo introduzido no critério de vigilância do módulo  $ART_a$  tem como finalidade excluir totalmente a categoria incompatível com a saída desejada representada em  $ART_b$ . Dessa forma, Atribui-se ( $T_j^a = 0$ ) e uma nova categoria deve ser encontrada em  $ART_a$  por meio de (24). Esse processo é realizado até que um nó escolhido no módulo  $ART_a$  satisfaça

o critério de combinação, ou seja, a expressão (25).

$$\rho_a = \frac{|\mathbf{I}^a \wedge \mathbf{W}_j^a|}{|\mathbf{I}^a|} + \varepsilon \quad (31)$$

Após a confirmação da categoria vencedora no módulo  $ART_a$ , via a ação do dispositivo *Match-Tracking*, define-se o vetor de atividade representado por  $Y = [Y_1^a \dots Y_N^a]$  que é obtido por meio de (32).

$$Y_J^a = 1 \text{ e } Y_j^a = 0 \text{ } j \neq J \quad (32)$$

### 6.3.7 Aprendizagem

O aprendizado ocorre quando o critério de vigilância no módulo inter-ART é satisfeito. Os pesos são atualizados por meio de (33), (34) e (35).

$$\mathbf{W}_J^{a(novo)} = \beta(\mathbf{I}^a \wedge \mathbf{W}_J^{velho}) + (1 - \beta)\mathbf{W}_J^{(velho)} \quad (33)$$

$$\mathbf{W}_K^{b(novo)} = \beta(\mathbf{I}^b \wedge \mathbf{W}_K^{velho}) + (1 - \beta)\mathbf{W}_K^{(velho)} \quad (34)$$

$$\mathbf{W}_{JK}^{ab(novo)} = 1 \text{ e } \mathbf{W}_{Jk}^{ab(novo)} = 0 \text{ se } k \neq K \quad (35)$$

## 6.4 FASE DE TESTE

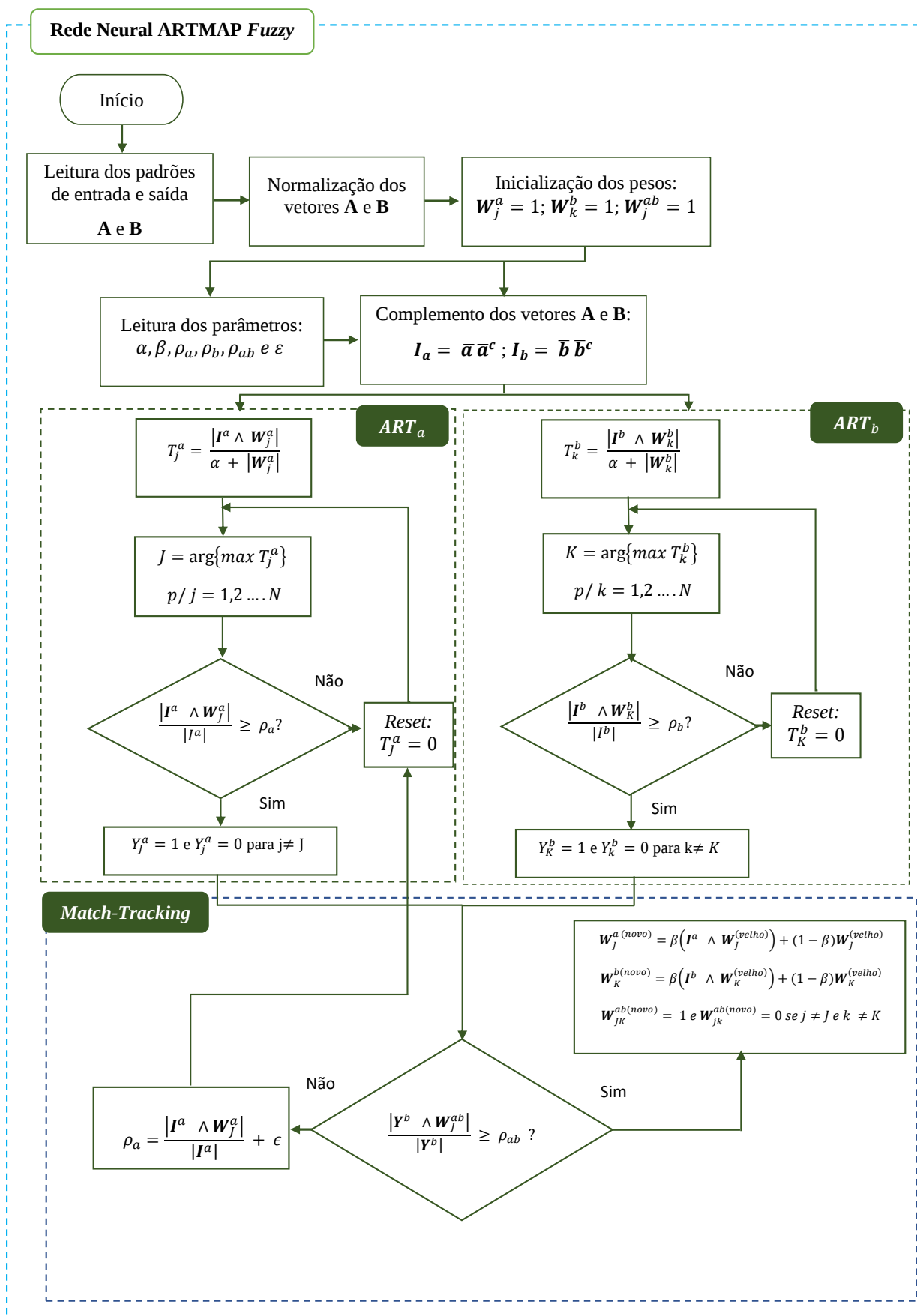
Os procedimentos para realização da fase de teste é realizada de acordo com (DECANINI et al., 2012):

- Passo 1: Nesta fase são realizadas as etapas de normalização via (16) e composição do vetor complementar via (18) dos vetores de entrada do módulo  $ART_a$ ;
- Passo 2: Identifica-se o neurônio vencedor  $J$  via (25) do módulo  $ART_a$  sem executar a atualização dos pesos;
- Passo 3: Efetua-se o cálculo de  $I^b$  via (36) e consequentemente  $b$ :

$$I^b = \mathbf{W}_J^{ab} x \mathbf{W}^b \quad (36)$$

O fluxograma da Rede Neural ARTMAP *Fuzzy* é apresentado na Figura 26.

Figura 26 - Fluxograma ARTMAP Fuzzy.



## 7 METODOLOGIA

Neste capítulo apresenta-se uma metodologia alternativa para detecção e classificação de faltas de curto-circuito em sistema de distribuição de energia elétrica balanceados e desbalanceados. Para análise do comportamento das correntes trifásicas medidas na saída da subestação, emprega-se a MODWT juntamente com AMR para decomposição do sinal em 4 níveis de resolução. Posteriormente, o conceito de energia é introduzido para composição do vetor contendo as energias das correntes trifásicas. O estado operativo do sistema é definido por meio do vetor de energia normalizado, que também compõe o vetor de entrada da RNA introduzida para classificação do curto-circuito e identificação das respectivas fases envolvidas na falta.

### 7.1 DETECÇÃO DE FALTAS DE CURTO-CIRCUITO

Quando ocorre uma perturbação no SDEE, isto é, um curto-circuito, os sinais de correntes das fases envolvidas sofrem alterações por um determinado período. Portanto, a detecção de faltas baseia-se na aquisição contínua dos sinais de correntes trifásicas medidas na saída da subestação. Neste trabalho, aplica-se a Transformada *Wavelet* Discreta de Sobreposição máxima (MODWT) para decomposição dos sinais. Os sinais de correntes são descompostos em quatro níveis de resolução, dos quais obtêm-se os componentes de detalhe ( $d_{ij}^k$ ) que representam as altas frequências, e os componentes de aproximação ( $a_{ij}^k$ ) que representam as baixas frequências do sinal original. O estado operativo do sistema é determinado por meio das energias normalizadas.

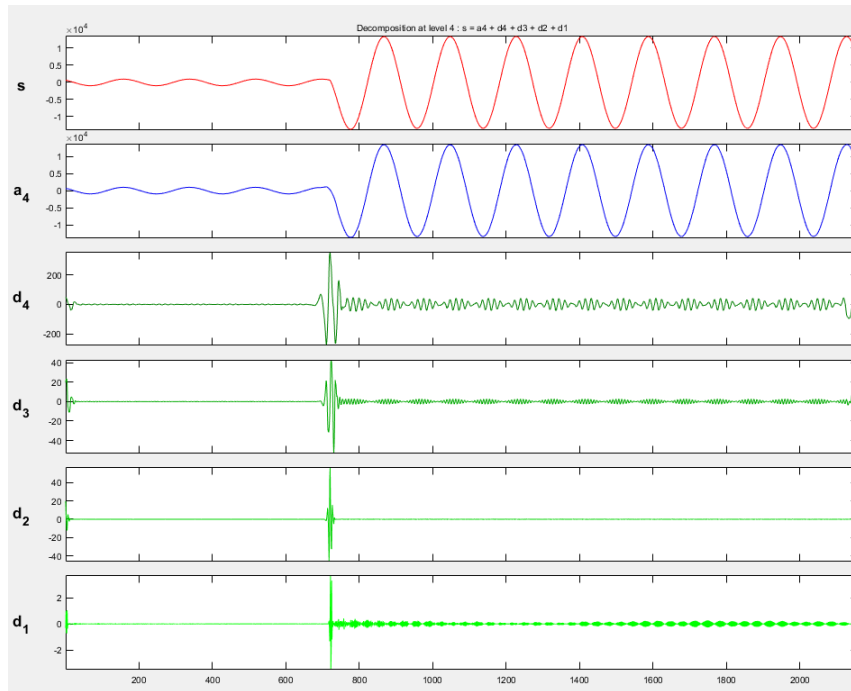
A metodologia para detecção de faltas em SDEE pode ser dividida em quatro etapas: (1) decomposição do sinal; (2) cálculo do valor da energia; (3) normalização e (4) detecção.

#### 7.1.1 Decomposição do Sinal

No processo de decomposição do sinal, foi aplicada uma taxa de amostragem de 10,8 kHz, a partir da qual são produzidas 180 amostras por ciclo. São produzidos 12 ciclos e 2.160 sinais de amostras, o tempo de simulação total compreende 200 ms. Os sinais de entrada são analisados de acordo com uma janela fixa de 540 amostras de sinais (3 ciclos) com passo de 3 ciclos.

Determina-se um limite inferior e superior para cada janela de dados, ou seja, são removidos

Figura 27 - Decomposição do sinal.



Fonte: elaboração da própria autora.

aproximadamente 10% dos dados iniciais e finais. A determinação de limites objetiva aumentar a confiabilidade dos dados, uma vez que os coeficientes de detalhes produzidos possuem valores agudos, podendo não representar o estado real do sistema para os instantes iniciais e finais, isto é,  $t_i = 0$  e  $t_f = 200\text{ms}$  (BERNARDES, 2019). A janela de dados é construída conforme as seguintes etapas:

1. Aplica-se a MODWT utilizando o filtro de quarta ordem da família Daubechies (db4) para decomposição do sinal em quatro níveis de resolução  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  e  $N_4$  conforme mostrado na Figura 27.
2. Obtém-se a AMR dos sinais por meio da função *modwtmra* (.) aplicando o filtro de quarta ordem da família Daubechies (db4) que fornece os coeficientes de detalhe dos quatro níveis de resolução  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  e  $d_4$ , cada nível contém 2.160 amostras.

Para a análise, os 2.160 sinais de amostras são separados em 4 lotes; cada lote contém 3 ciclos e 540 sinais.

### 7.1.2 Energia do Sinal

A energia do sinal é calculada de acordo com o teorema de Parseval (OPPENHEIM et al., 1998) e obtida via (37). Neste trabalho, aplica-se somente os coeficientes do quarto nível de

resolução para o cálculo da energia de cada fase conforme (38).

$$E_i = \sum_{k=1}^{N_i} |x[n]|^2 \quad (37)$$

$$E_i = \sum_{k=1}^{N_i} |d_{i,N_4}^n[n]|^2 \quad (38)$$

Sendo:

$E_{(i,N_4)}$ : valor da energia dos coeficientes de detalhe do sinal de corrente da fase  $i$ ;

$d_{(i,N_4)}^n$ : o  $n$ -ésimo coeficiente de detalhe do sinal de corrente da fase  $i$  no quarto nível de decomposição.

O vetor de energia obtido via (39) é composto pelas energias de  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  respectivamente.

$$E = [E_{aN_4} \ E_{bN_4} \ E_{cN_4}] \quad (39)$$

### 7.1.3 Normalização

A normalização das energias dos sinais é realizada dividindo a energia de cada fase pela raiz quadrada da soma das energias de  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  conforme (40).

$$\bar{E}_i = \frac{E_{iN_4}}{\sqrt{(E_{aN_4})^2 + (E_{bN_4})^2 + (E_{cN_4})^2}} \quad (40)$$

Somente os vetores contendo anomalia são normalizados. Quando o sistema está operando em condições normais, os valores dos coeficientes de detalhe já estão compreendidos entre [0 1].

### 7.1.4 Detecção

Neste processo, para determinação do estado operativo do sistema comparam-se as energias normalizadas e o valor máximo do coeficiente de detalhe ( $d_{iN_4}$ ) com o limite de variação pré estabelecido para cada fase ( $l_i$ ). Se pelo menos uma das fases ultrapassar o limite preestabelecido e o seu respectivo coeficiente de detalhe do quarto nível de resolução, o estado de falta é confirmado (SANTOS et al., 2020).

Se as condições em (41) forem satisfeitas, identifica-se uma anomalia e o estado opera-

tivo do sistema é definido “*sistema com anomalia*”; caso contrário, é definido como “*sistema operando normalmente*” se as condições em (42) forem satisfeitas.

$$SE \text{ o } Max \bar{E}_i > l_i \text{ E } Max |d_{iN_4}| > l_i \quad (41)$$

$$SE \text{ o } Max \bar{E}_i \leq l_i \text{ OU } Max |d_{iN_4}| \leq l_i \quad (42)$$

Sendo:

$E_i$ : valor da energia normalizada da fase  $i$ ;

$l_i$ : limite das correntes da fase  $i$  (estabelecido pelo engenheiro de proteção);

$d_{iN_4}$ : coeficiente de detalhe do quarto nível de resolução da fase  $i$ .

## 7.2 CURTO COM CONEXÃO COM A TERRA

Os curtos-circuitos bifásicos e trifásicos foram simulados com e sem conexão com a terra. Quando o curto possui conexão com a terra, as amplitudes das correntes alcançam valores elevados quando comparado com curtos sem conexão. Na Figura 28 são mostradas duas simulações, onde as oscilografias com valores maiores representam o curto-circuito com conexão com a terra, enquanto as oscilografias com valores menores representam a ausência de conexão. Percebe-se a diferença dos sinais, sendo que os valores de corrente para os curtos-circuitos com conexão são maiores em relação aos curtos sem conexão.

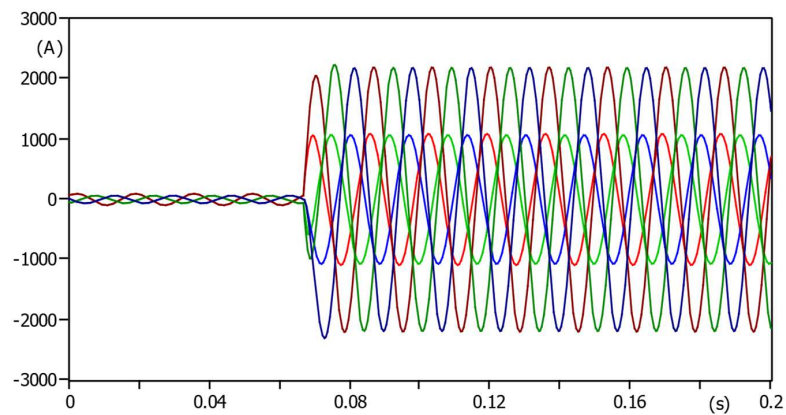
O cálculo para verificação é realizado de acordo com (DECANINI et al., 2012). Por meio da equação (43) calcula-se o valor da corrente total.

$$I_{total} = max(I_a) + max(I_b) + max(I_c) \quad (43)$$

O valor obtido é comparado com a corrente máxima estabelecida. O estado de conexão é determinado por meio de (44) e (45). Se (44) for satisfeita, então, existe um curto-circuito *sem* conexão à terra; caso contrário, se (45) for satisfeita, existe um curto-circuito *com* conexão à terra.

$$Se \ I_{total} < I_{max}, \ \eta = 0 \quad (44)$$

Figura 28 - Comparativo de valores de curto-circuito com e sem conexão com à terra.



Fonte: elaboração da própria autora.

$$\text{Se } I_{total} > I_{max}, \quad \eta = 1 \quad (45)$$

### 7.3 CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS DE CURTO-CIRCUITO

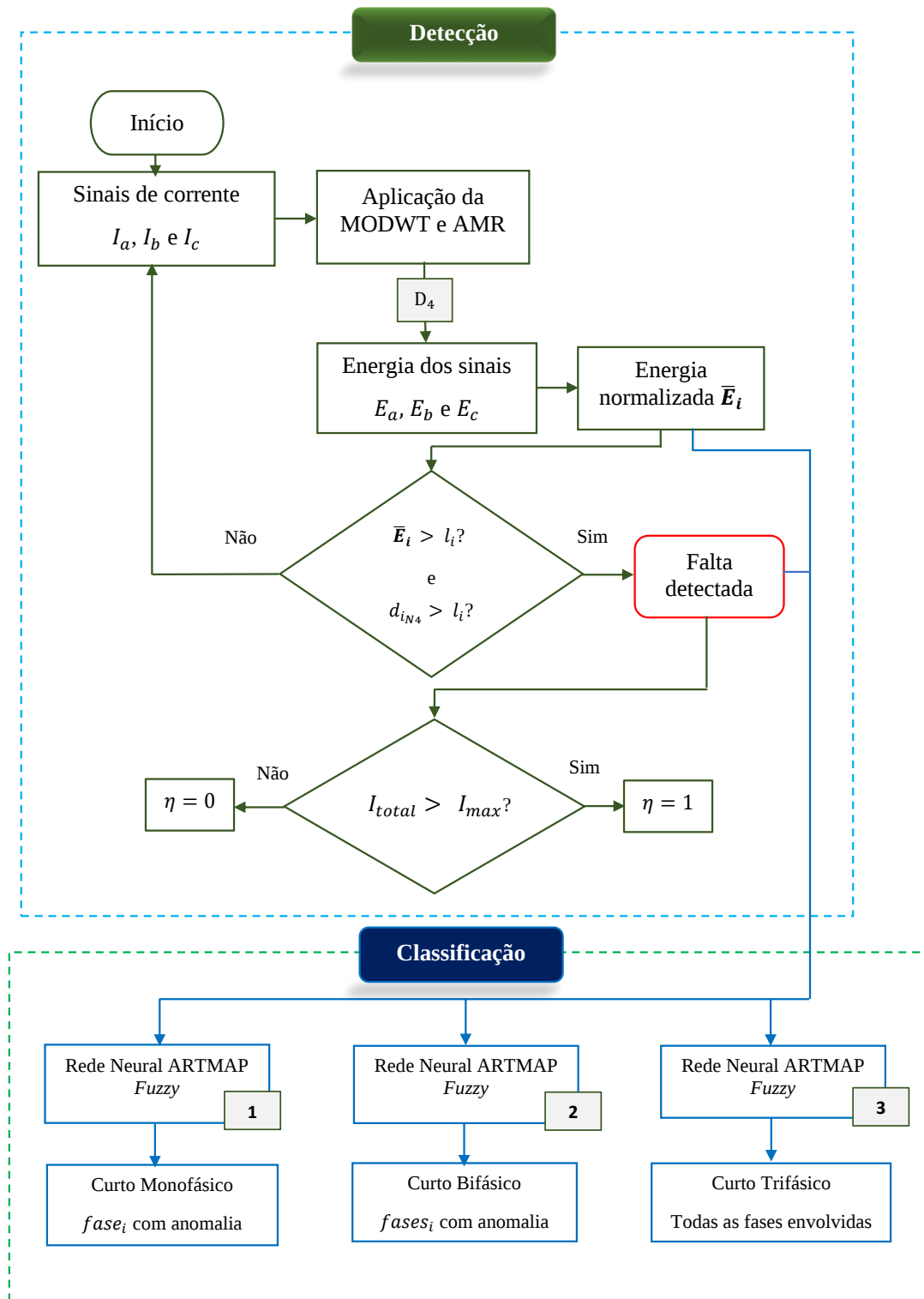
Após o estado de falta ser confirmado, o processo de classificação é ativado, no qual identificam-se as fases envolvidas no curto-circuito por meio da Rede Neural ARTMAP Fuzzy. A fim de maximizar a eficiência da rede no processo de classificação, aplicou-se uma rede neural específica para cada tipo de curto.

O vetor de entrada do módulo  $ART_a$  é composto pelas energias normalizadas das correntes trifásicas. Os valores estão compreendidos no intervalo entre [0,1]. A saída desejada é composta pelas codificações de cada circuito-circuito e é representada no módulo  $ART_b$ . O algoritmo de treinamento da rede ARTMAP Fuzzy é apresentado no Capítulo 6 seção 6.2.

A codificação de saída para cada tipo de curto é apresentada na Tabela 6, onde as fases operando dentro dos padrões normais recebem o bit 0 (baixo), já para as fases com anomalia atribui-se o bit 1 (alto).

As etapas da estratégia para detecção e classificação das faltas de curto-circuito descritas nas Seções (7.1) e (7.3), respectivamente, estão resumidas na Figura 29.

Figura 29 - Fluxograma da metodologia para detecção e classificação de curto-circuitos.



Fonte: Elaboração da própria autora.

Tabela 6 - Codificação de saída da rede ARTMAP *Fuzzy*.

| Tipo de Curto-Circuito | Saída das Fases Envolvidas |        |        |
|------------------------|----------------------------|--------|--------|
|                        | Fase A                     | Fase B | Fase C |
| Sistema normal         | 0                          | 0      | 0      |
| Ag                     | 1                          | 0      | 0      |
| Bg                     | 0                          | 1      | 0      |
| Cg                     | 0                          | 0      | 1      |
| AB                     | 1                          | 1      | 0      |
| BC                     | 0                          | 1      | 1      |
| CA                     | 1                          | 0      | 1      |
| ABC                    | 1                          | 1      | 1      |

Fonte: elaboração da própria autora.

## 8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho, aplica-se uma metodologia alternativa para detecção e classificação de faltas de curto-circuito com o emprego do sistema-teste IEEE-34, por meio do qual, construiu-se quatro cenários considerando cenários com a inserção e sem a inserção de GD.

O sistema foi modelado no *software* ATPDraw. As diversas condições de falta foram realizadas a uma taxa de amostragem de 10,8 kHz. No algoritmo de detecção foram empregues as funções *modwt(.)*, *modwtmra(.)*. A metodologia para detecção e o classificador de faltas foram desenvolvidos no ambiente do software *MATLAB*®. Todas as simulações foram executadas em um computador pessoal com processador Intel Core i7; 1,8–1,99 GHz e 8 GB de memória RAM.

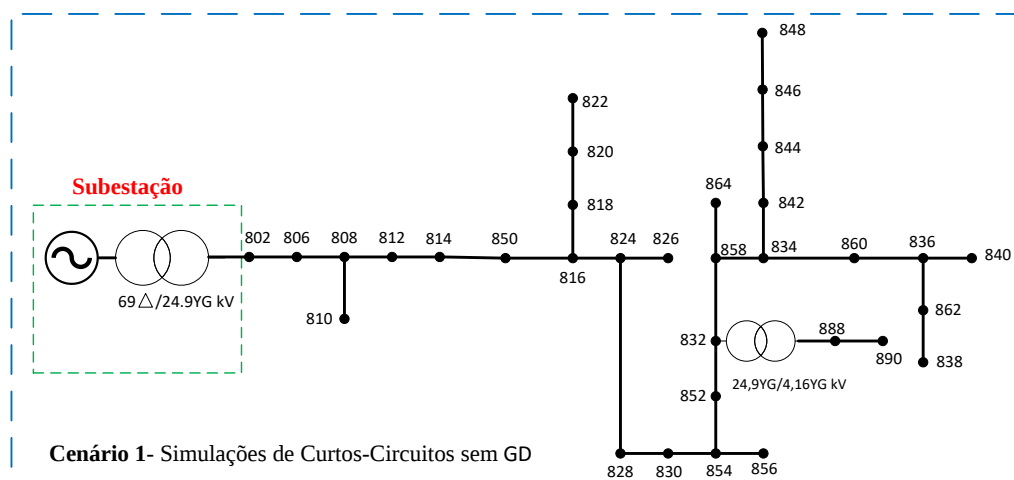
### 8.1 SISTEMA TESTE IEEE-34 BARRAS MODIFICADO

O sistema-teste IEEE 34 barras (IEEE, 2010) é um alimentador real localizado no Estado do Arizona EUA, com tensão nominal de 24,9 kV e 34 barras. O sistema original é composto por ramos trifásicos, monofásicos, cargas pontuais e cargas distribuídas desbalanceadas. Possui capacitores *Shunt* e reguladores de tensão. Os dados do sistema são apresentados no apêndice A.

Neste trabalho, para os cenários 1, 2 e 3 considera-se o sistema composto somente por ramos trifásicos e cargas concentradas devidamente equilibradas, modeladas ao longo do alimentador com o modelo de impedância constante. Os religadores de tensão foram removidos. Para o cenário 4, o sistema foi modelado com ramos trifásicos, cargas distribuídas desbalanceadas e cargas concentradas equilibradas. Os capacitores e reguladores de tensão foram removidos neste cenário.

As diversas condições de faltas foram realizadas no sistema IEEE-34 barras modificado de forma randômica. Primeiramente, criou-se um número de possíveis combinações para cada tipo de curto variando os seguintes parâmetros: resistência de falta, ângulo de inserção, tipo de curto-circuito, carregamento do sistema e localização da falta. Em seguida, aplicou-se a função *Randi(.)* do *MATLAB*, para extração de combinações de forma aleatória para realização das simulações no ATPDraw. Os curtos-circuitos com resistências superiores a 40  $\Omega$  são carac-

Figura 30 - Sistema IEEE-34 barras sem GD.



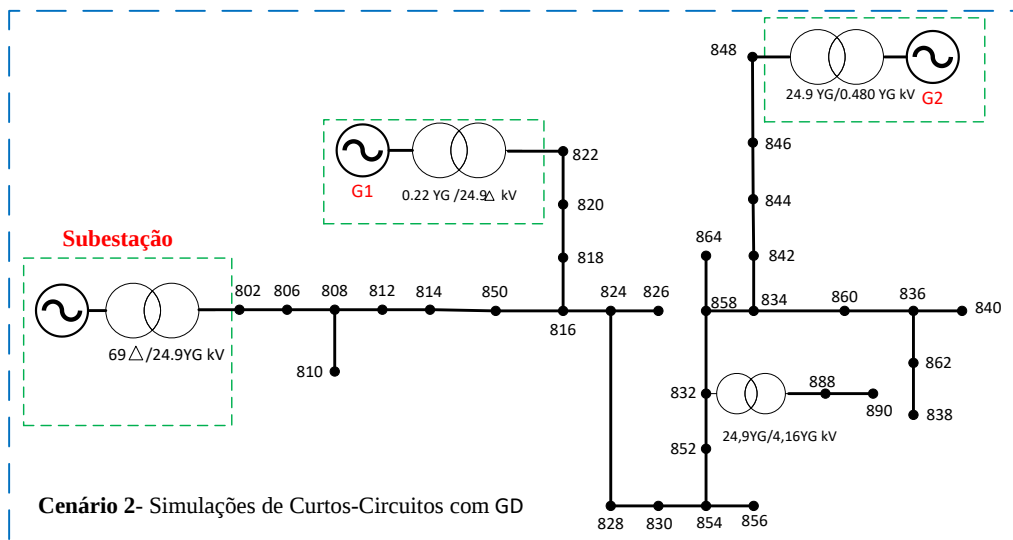
Fonte: adaptado de IEEE (2010).

terizados como FAI. As simulações de curtos-circuitos foram realizadas considerando quatro cenários:

1. **Cenário 1:** Simulações realizadas sem GD conforme mostrado na Figura 30 ;
2. **Cenário 2:** Neste cenário, conforme mostrado na Figura 31, foi inserida GD a partir de dois geradores síncronos de acordo com (MOTTER; VIEIRA, 2018), introduzidos nas barras 822 e 848. Os geradores possuem tensões nominais de 220V e 480 V respectivamente;
3. **Cenário 3:** Neste cenário, introduziram-se 4 geradores distribuídos ao longo do sistema, conforme mostrado na Figura 32. Nas barras 822, 828 e 844 foi inserido geradores síncronos com tensão nominal de 220V, enquanto na barra 848 foi inserido um gerador com tensão nominal de 480V;
4. **Cenário 4 :** Simulações realizadas com o sistema trifásico e cargas desbalanceadas. Foram introduzidos dois geradores síncronos um na barras 822 e outro na 848. Os geradores possuem tensões nominais de 220V e 480 V respectivamente.

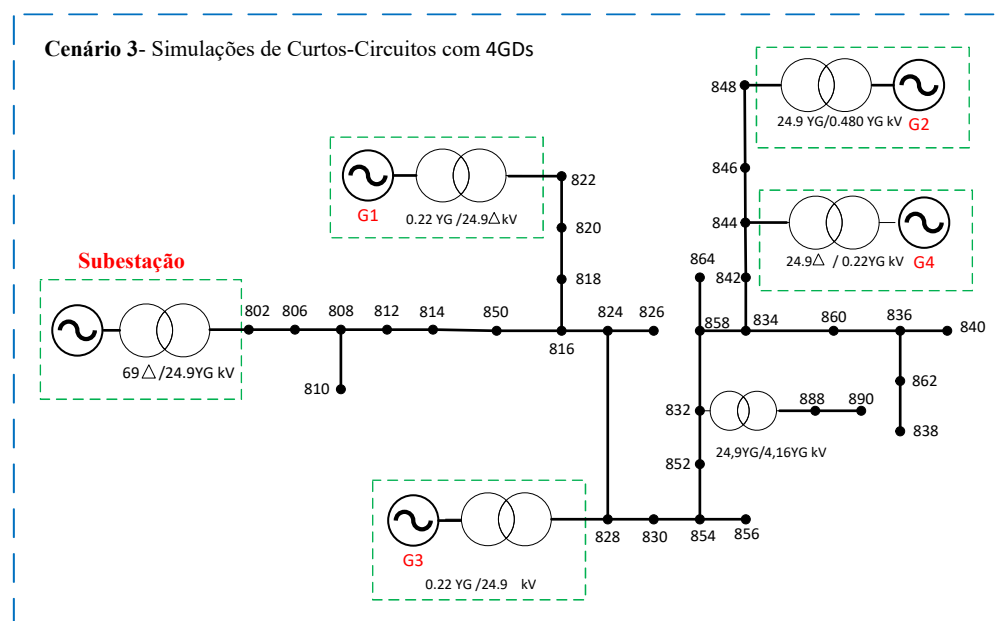
A criação composição de cenários objetiva verificar o comportamento da metodologia no que tange à detecção e à classificação mediante as alterações realizadas no sistema IEEE-34.

Figura 31 - Sistema IEEE-34 barras com 2 GDs.



Fonte: adaptado de IEEE (2010).

Figura 32 - Sistema IEEE-34 barras com 4 GDs.



Fonte: adaptado de IEEE (2010).

Tabela 7 - Parâmetros das simulações para os cenários 1 e 2.

| Cenário 1                         |                                                           | Cenário 2                                                 |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Parâmetros do Sistema             | Valores                                                   | Valores                                                   |
| Resistência de falta ( $\Omega$ ) | 10, 20, 50 70 e 100                                       | 1, 5, 10, 20, 50, 70 e 100                                |
| Ângulo de inserção                | 0° e 90°                                                  | 0°, 45° e 90°                                             |
| Tipo de curto                     | $A_g, B_g, C_g, AB, AC, BC, AB_g, BC_g, AC_g, ABC, ABC_g$ | $A_g, B_g, C_g, AB, AC, BC, AB_g, BC_g, AC_g, ABC, ABC_g$ |
| Carregamento (%)                  | 40, 60, 80 e 100                                          | 40, 60, 80 e 100                                          |
| Localização das barras em falta   | 806, 810, 820, 828 e 840                                  | 806, 810, 820 e 828                                       |

Fonte: elaboração da própria autora.

Tabela 8 - Parâmetros das simulações para os cenários 3 e 4.

| Canário 3                         |                                                           | Cenário 4                                                 |
|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Parâmetros do Sistema             | Valores                                                   | Valores                                                   |
| Resistência de falta ( $\Omega$ ) | 1, 5, 10, 20, 40, 60, 80 e 100                            | 1, 5, 10, 20, 40, 60, 80 e 100                            |
| Ângulo de inserção                | 0°, 45° 90°                                               | 0° e 45°                                                  |
| Tipo de curto                     | $A_g, B_g, C_g, AB, AC, BC, AB_g, BC_g, AC_g, ABC, ABC_g$ | $A_g, B_g, C_g, AB, AC, BC, AB_g, BC_g, AC_g, ABC, ABC_g$ |
| Carregamento (%)                  | 40, 60, 80 e 100                                          | 60, 80, 100 e 120                                         |
| Localização das barras em falta   | 806, 810, 820, 826 e 856                                  | 806, 810, 820, 830 e 840                                  |

Fonte: elaboração da própria autora.

## 8.2 DETECÇÃO DE FALTAS DE CURTO-CIRCUITO

Nesta seção, apresentam-se os resultados do processo de detecção para os quatro cenários implementados neste estudo.

### 8.2.1 Sistemas Equilibrados

No Cenário 1, foram geradas 660 simulações para o curto-circuito monofásico ( $1\phi$ ), 600 simulações para o curto bifásico ( $2\phi$ ) e também para trifásico ( $3\phi$ ) totalizando 1.860 simulações. No Cenário 2 foram realizadas 500 simulações para cada tipo de curto, totalizando 1.500 simulações. E por fim, para o cenário 3 foram geradas 300 simulações para cada curto totalizando 900 simulações.

Os parâmetros empregados para modelagem do sistema e realização das simulações para os três cenários são mostrados nas Tabelas 7 e 8.

Os limites de variação adotados para detecção dos curtos-circuitos são mostrados na Tabela 9. Adota-se um limite de variação em cada fase. Por exemplo, para a Fase A, o limite inferior e

Tabela 9 - Limite de variação das correntes trifásicas.

| Parâmetros | Fase A |     | Fase B |     | Fase C |     |
|------------|--------|-----|--------|-----|--------|-----|
| Variação   | Min    | Max | Min    | Max | Min    | Max |
| $I_i$      | 0,001  | 0,2 | 0,001  | 0,2 | 0,001  | 0,2 |

Fonte: elaboração da própria autora.

superior é de 0,001 e 0,2 respectivamente. Esses limites foram estabelecidos de forma empírica, ou seja, a partir de um conjunto de testes foi observado que nas fases com estado operativo normal, tanto a energia normalizada como os respectivos coeficientes de detalhes apresentam valores próximos de zero. Já para as fases com anomalia, os valores das energias normalizadas se aproximam de 1 enquanto os coeficientes de detalhe possuem valores elevados.

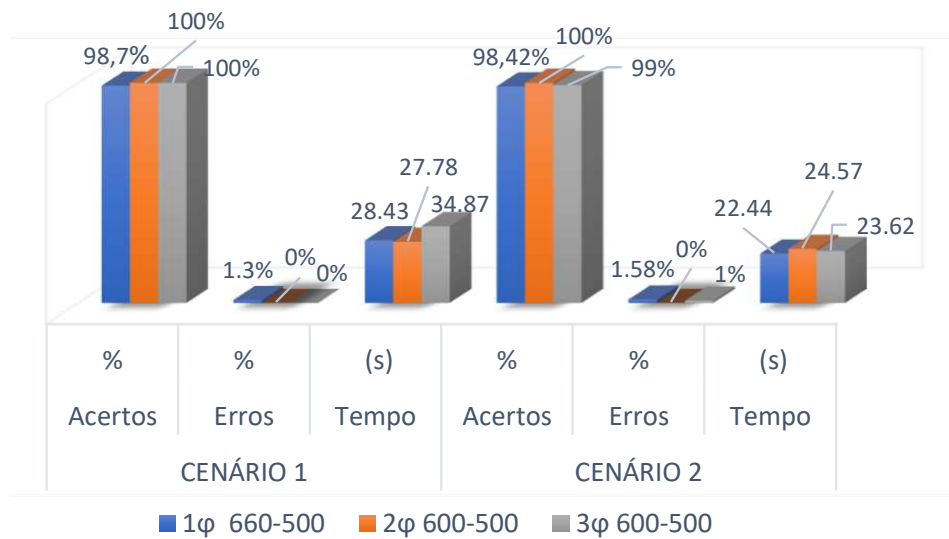
Os resultados das simulações para detecção de curtos-circuitos dos cenários 1 e 2 são mostrados na Figura 33. No cenário 1, observa-se que foram detectados corretamente 100% dos curtos-circuitos bifásicos e trifásicos, enquanto o percentual dos curtos monofásicos atingiu mais de 98% de acertos. As detecções errôneas ocorreram principalmente nas combinações de carregamento leve (40%) e resistência de falta elevada – 100 (FAI). No Cenário 2, foram detectados corretamente 100% dos curtos-circuitos bifásicos, enquanto o percentual de acertos para os curtos-circuitos monofásicos e trifásicos foi superior a 98%.

Na Figura 34 apresentam-se os resultados do Cenário 3, o percentual de acerto do curto-circuito monofásico atingiu 99%, enquanto os curtos bifásicos e trifásicos atingiram um percentual superior a 98%. A metodologia para detecção apresentou resultados eficientes embora a topologia do SDEE tenha sofrido alterações em razão da inserção de 2 geradores síncronos no cenário 2 e 4 no cenário 3.

### 8.2.2 Sistemas Desequilibrados Cenário 4

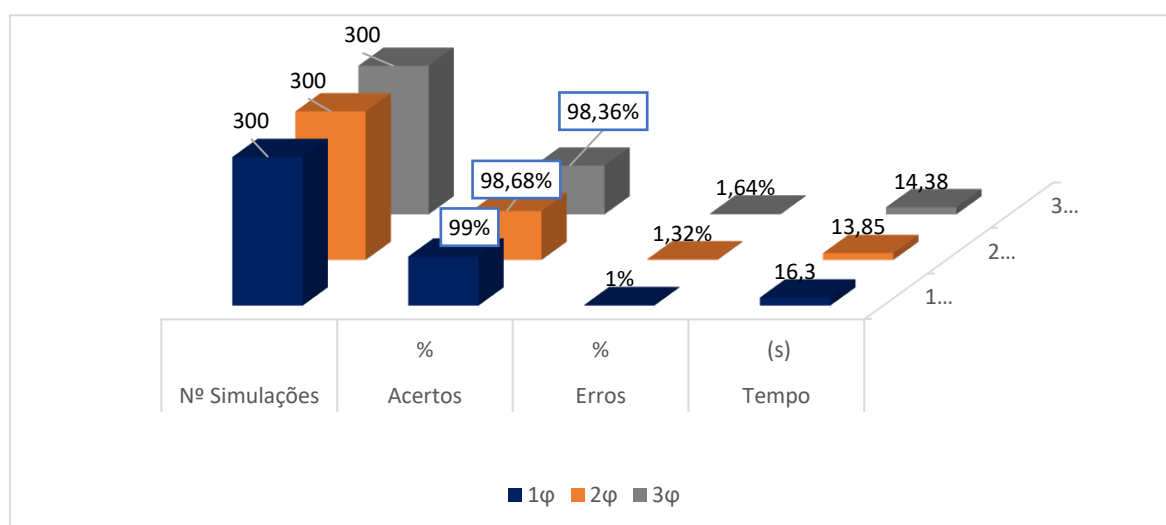
Na Figura 35 são apresentados os resultados do estágio de detecção para o Cenário 4. A metodologia de detecção apresentou resultados satisfatórios, uma vez que o sistema modelado possui linhas trifásicas desequilibradas e cargas distribuídas ao longo do alimentador também desequilibradas. O acerto apurado para os curtos-circuitos monofásicos atingiu 100%, já para o curtos-circuitos bifásicos e trifásicos o percentual de acerto foi superior a 98%. Dessa forma, a metodologia apresentou bons resultados tanto para sistemas equilibrados, quanto para desequilibrados.

Figura 33 - Resultados das simulações para detecção de faltas para os cenários 1 e 2.



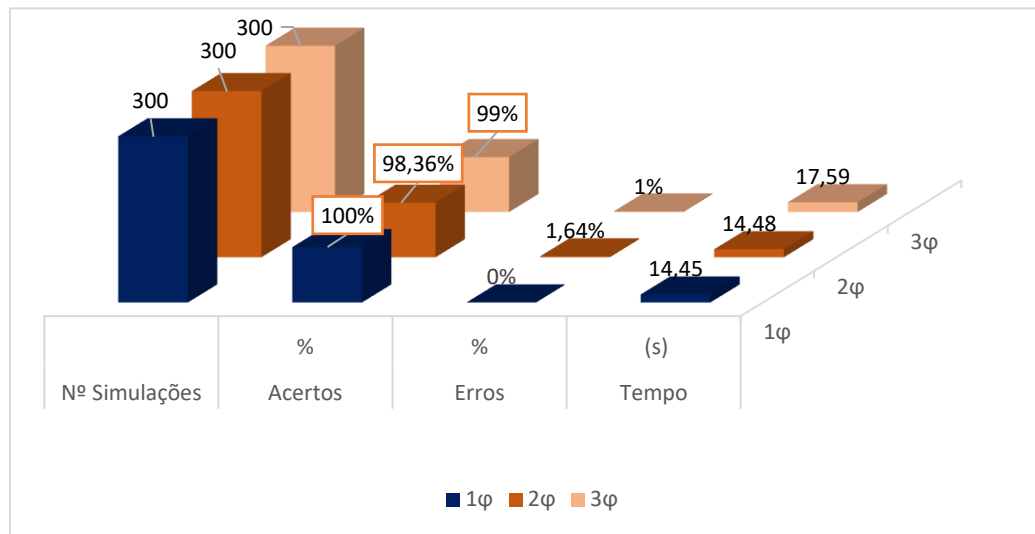
Fonte: elaboração da própria autora.

Figura 34 - Resultados das simulações para detecção de faltas para o cenário 3.



Fonte: elaboração da própria autora.

Figura 35 - Resultados das simulações para detecção de faltas para o cenário 4.



Fonte: elaboração da própria autora.

Tabela 10 - Parâmetros da Rede ARTMAP *Fuzzy* para os cenários 1 e 2.

| Parâmetros    | Cenário 1 |          |          | Cenário 2 |          |          |
|---------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|               | 1 $\phi$  | 2 $\phi$ | 3 $\phi$ | 1 $\phi$  | 2 $\phi$ | 3 $\phi$ |
| $\alpha$      | 0,1       | 0,1      | 0,1      | 0,1       | 0,1      | 0,1      |
| $\beta$       | 1         | 1        | 1        | 1         | 1        | 1        |
| $\rho_a$      | 0,45      | 0,45     | 0,45     | 0,45      | 0,45     | 0,45     |
| $\rho_b$      | 1         | 1        | 1        | 1         | 1        | 1        |
| $\rho_{ab}$   | 0,95      | 0,95     | 0,95     | 0,95      | 0,95     | 0,95     |
| $\varepsilon$ | 0,004     | 0,004    | 0,004    | 0,004     | 0,004    | 0,004    |

Fonte: elaboração da própria autora.

### 8.3 CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS

No processo de classificação, três redes neurais ARTMAP *Fuzzy* distintas são ativadas. A aplicação de uma rede para cada tipo de curto, permite a maximização do percentual de acertos no processo de classificação. Essas redes fornecem em seu vetor de saída as respectivas fases envolvidas nos curtos-circuitos monofásicos, bifásicos e trifásicos.

Na Tabela 10 são apresentados os parâmetros adotados nas simulações de classificação de distúrbios para os cenários 1 e 2. Na Tabela 11 são apresentados os parâmetros para os cenários 3 e 4.

O processo de classificação foi dividido em duas etapas: treinamento e teste. Na fase de

Tabela 11 - Parâmetros Rede ARTMAP *Fuzzy* para os cenários 3 e 4.

| Parâmetros    | Cenário 3 |          |          | Cenário 4 |          |          |
|---------------|-----------|----------|----------|-----------|----------|----------|
|               | 1 $\phi$  | 2 $\phi$ | 3 $\phi$ | 1 $\phi$  | 2 $\phi$ | 3 $\phi$ |
| $\alpha$      | 0,1       | 0,1      | 0,1      | 0,1       | 0,1      | 0,1      |
| $\beta$       | 1         | 1        | 1        | 1         | 1        | 1        |
| $\rho_a$      | 0,45      | 0,45     | 0,45     | 0,45      | 0,45     | 0,45     |
| $\rho_b$      | 1         | 1        | 1        | 1         | 1        | 1        |
| $\rho_{ab}$   | 0,75      | 0,75     | 0,75     | 0,95      | 0,95     | 0,95     |
| $\varepsilon$ | 0,004     | 0,004    | 0,004    | 0,004     | 0,004    | 0,004    |

Fonte: elaboração da própria autora.

treinamento apresenta-se 70% dos padrões de forma pseudoaleatória para realização do treinamento da rede neural. Já na fase de teste, são apresentados 30% dos padrões de forma pseudoaleatória, no qual a eficiência da rede é medida de acordo com o percentual de acertos obtidos neste processo.

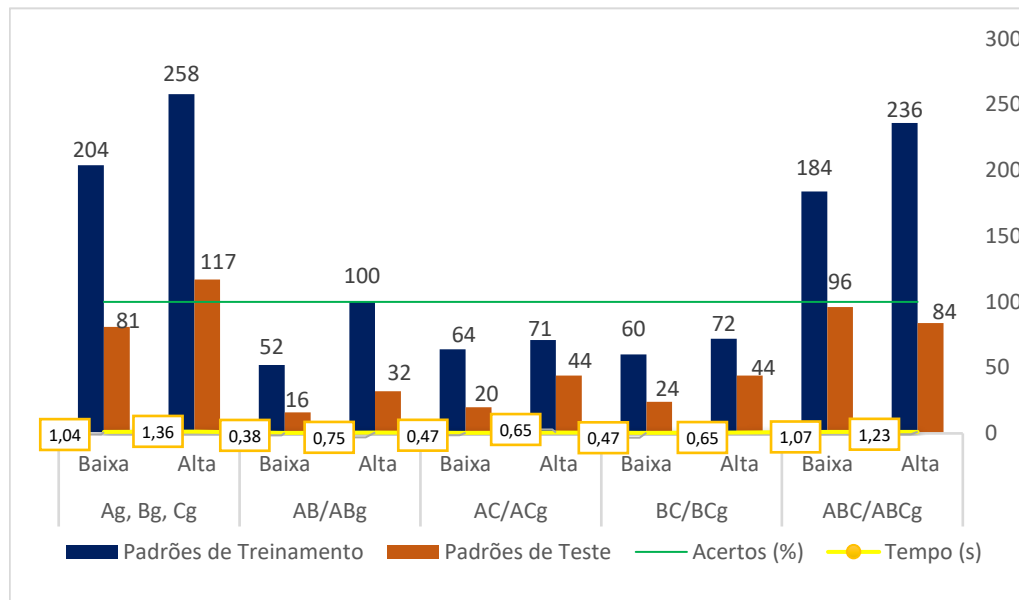
No Cenário 1, foram apresentados 1.860 padrões para a rede neural ARTMAP *Fuzzy* realizar as respectivas classificações. Sendo 1.302 utilizados na fase de treinamento (70% dos padrões) e 558 na fase de teste (30% dos padrões). Na Figura 36 são apresentados os resultados do processo de classificação para o cenário 1, o tempo computacional em segundos está representado dentro do retângulo próximo à linha amarela. O classificador apresentou uma eficiência de 100% tanto para FAIs quanto para FBIs, ou seja, todos os padrões apresentados na fase de teste foram classificados corretamente.

Na Figura 37 tem-se os resultados obtidos na etapa de classificação para o cenário 2. Foram apresentados 1.500 padrões, sendo 1.050 para treinamento e 450 para teste. O classificador apresentou um excelente desempenho, classificando corretamente 100% dos padrões.

Na Figura 38 apresentam-se os resultados obtidos na etapa de classificação para o cenário 3. No total, foram apresentados 900 padrões, sendo 630 para treinamento e 270 para teste. Para os curtos-circuitos monofásicos o classificador apresentou 100% de assertividade, enquanto para os curtos-circuitos bifásicos e trifásicos o acerto apurado foi superior a 98%. Nota-se uma queda nas classificações dos curtos bifásicos e trifásicos. Com a introdução de 4 geradores distribuídos as energias normalizadas das fases normais apresentaram um aumento para algumas combinações de parâmetros. Como consequência, a RNA pode classificar de forma errônea um curto-circuito ou a respectiva fase envolvida na falta.

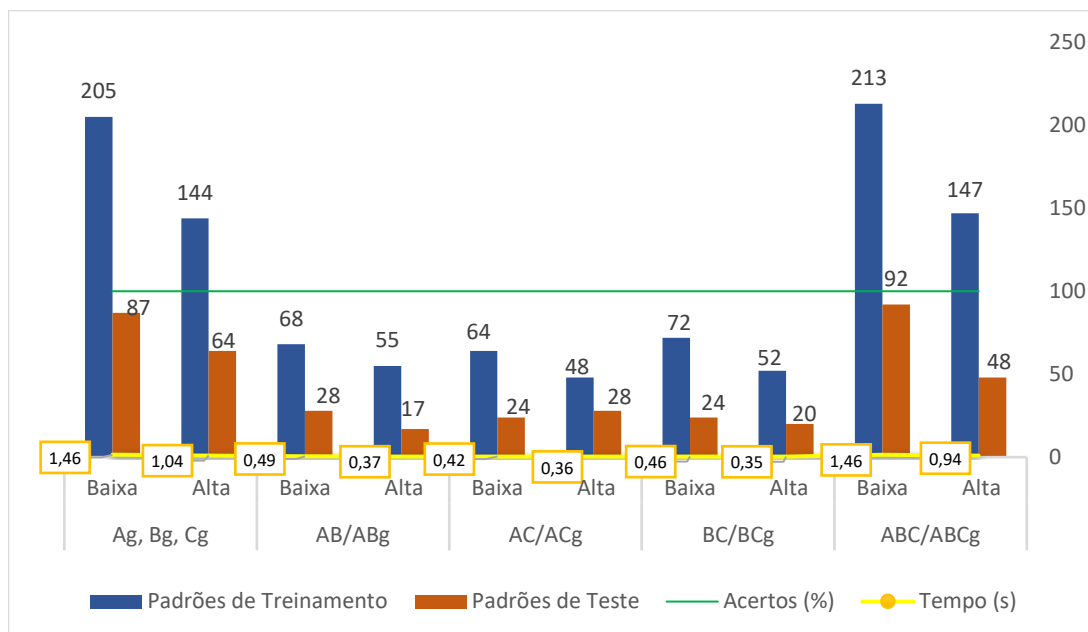
Na Figura 39 são apresentados os resultados obtidos na etapa de classificação para o cenário 4, com o sistema desequilibrado. Foram apresentados 900 padrões, sendo 630 para treinamento e 270 para teste. Para os curtos-circuitos monofásicos, bifásicos e trifásicos o classificador

Figura 36 - Resultados classificações para o cenário 1.



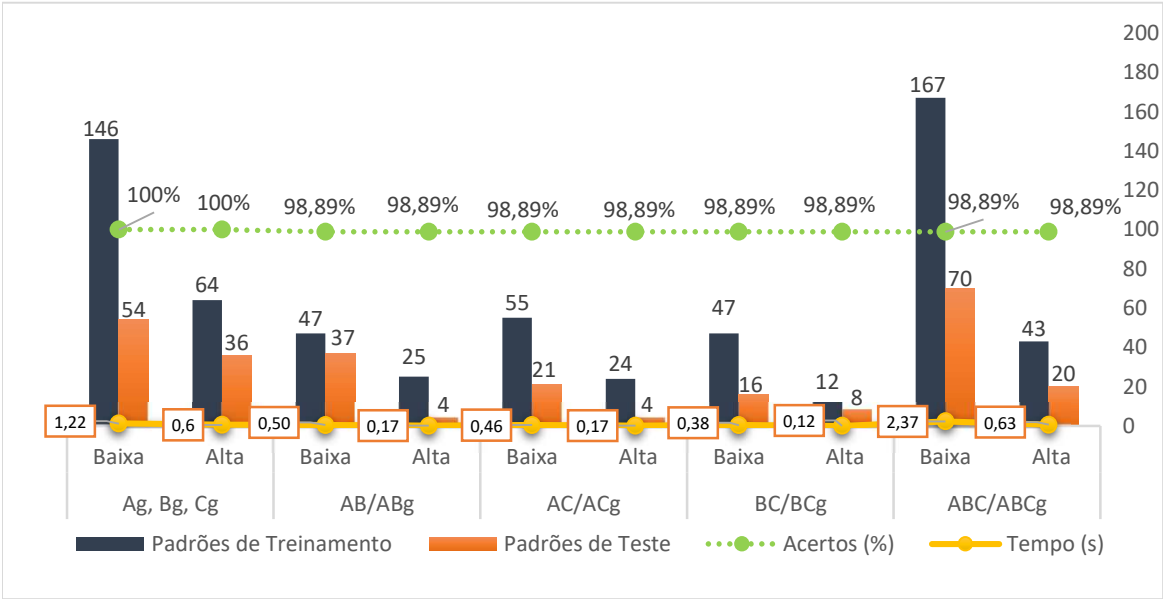
Fonte: elaboração da própria autora.

Figura 37 - Resultados classificações para o cenário 2.



Fonte: elaboração da própria autora.

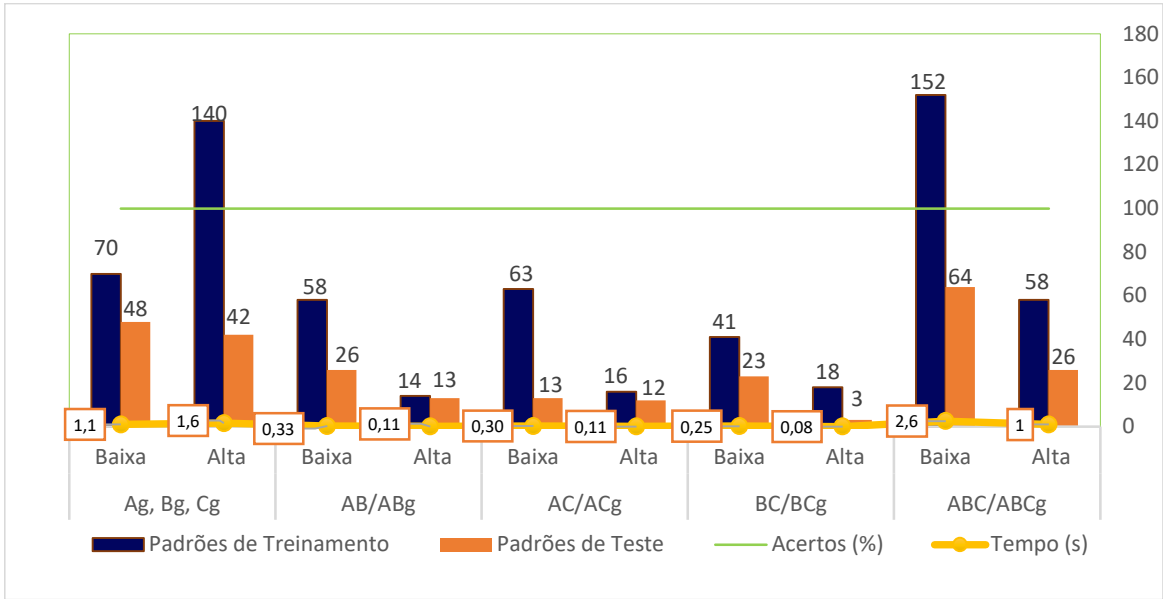
Figura 38 - Resultados classificações para o cenário 3.



Fonte: elaboração da própria autora.

apresentou 100% assertividade.

Figura 39 - Resultados classificações para o cenário 4.



Fonte: elaboração da própria autora.

## 9 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvido uma metodologia alternativa para a detecção e classificação de faltas de curto-circuito em sistemas de distribuição equilibrados e desequilibrados com a inserção de geração distribuída. O algoritmo de detecção dos curtos-circuitos é baseado nos sinais das correntes trifásicas medidos na saída da subestação. Para obtenção das oscilografias das correntes trifásicas, modelou-se o sistema teste no software ATPdraw, no qual foram aplicadas diversas condições de faltas em vários pontos do sistema, variando o ângulo de incidência, o tipo de curto-circuito e os valores das resistências de falta.

Para decomposição e análise dos sinais, aplicam-se a MODWT e a AMR. Por meio do filtro (db4) o sinal foi descomposto em quatro níveis de resolução. Neste processo, obtém-se os coeficientes de detalhes que representam as altas frequências do sinal original; o quarto nível  $d_4$  foi aplicado para o cálculo da energia do sinal. As energias normalizadas dos sinais das correntes trifásicas foram aplicadas tanto para definir o estado operativo do sistema quanto para classificar o tipo de curto e as respectivas fases envolvidas na falta. A detecção da falta foi realizada a partir da análise comparativa das energias normalizadas e os limites de variação das correntes estabelecidos para cada fase. Os resultados obtidos na fase de detecção mostraram-se eficientes, sendo capaz de detectar todos os tipos de curtos implementados neste estudo; atingindo mais 98% de assertividade em todos cenários adotados com e sem GD, tanto em sistemas equilibrados quanto desequilibrados.

Três redes neurais ARTMAP-*Fuzzy* distintas foram implementadas em cada cenário para classificar os tipos de curtos-circuitos e fornecer as respectivas fases envolvidas na falta. No geral, foram apresentados às redes 3.612 padrões para realização do treinamento o que equivale a 70% dos dados. A eficiência das redes foi medida de acordo com os percentuais de acertos obtidos na fase de teste, portanto nesta etapa foram apresentados às redes 1.548 padrões o que corresponde à 30% dos dados. Por meio dos resultados, pode-se notar o alto desempenho alcançado pelas redes neurais nos quatro cenários. Nos cenários 1, 2 e 4, foram classificados corretamente 100% dos curtos-circuitos apresentados à rede. Já o cenário 3, o percentual apurado para o curto-circuito monofásico foi de 100%, enquanto para os curtos-circuitos bifásico e trifásico o acerto foi superior a 98%.

As simulações foram realizadas em diferentes cenários. Em cada cenário a topologia do

sistema foi alterada a fim de verificar a eficiência da metodologia proposta. O método foi testado tanto em sistemas trifásicos equilibrados quanto em sistemas desequilibrados, com e sem inserção de GD. Neste contexto, conclui-se que a metodologia proposta para detecção e classificação de curtos-circuitos em SDEE apresentou resultados robustos para todos os cenários implementados. No geral, o acerto apurado foi superior a 98% tanto para o processo de detecção, como para o de classificação. Os resultados em cada cenário, foram alcançados com apenas uma execução ou época para as fases de treinamento e teste. Portanto, ressalta-se o baixo esforço computacional necessário para obtenção dos resultados.

## 9.1 SUGESTÃO TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolver uma metodologia para localização de faltas de curto-circuito em SDEE com alta penetração de GD;
- Desenvolver uma interface para comunicação automática entre o ATPDraw e o MATLAB;
- Introduzir a GD de forma estocástica no SDEE, uma vez que fontes de geração de energia como solar fotovoltaica e Eólica dependem de condições climáticas.

## REFERÊNCIAS

- ABEEOLICA. **Boletim Anual de Geração Eólica**, São Paulo. 2019. Disponível em: <[http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2020/06/Boletim-Anual-de-Geracao-Eolica-2019\\_V7.pdf](http://abeeolica.org.br/wp-content/uploads/2020/06/Boletim-Anual-de-Geracao-Eolica-2019_V7.pdf)>. Acesso em: 15 Jul. 2020.
- ABRADEE. **Redes de Energia Elétrica**, Brasília. 2019. Disponível em: <<https://www.abradee.org.br/setor-eletrico/redes-de-energia-eletrica/>>. Acesso em: 17 Jul. 2020.
- ANEEL. **Resolução Normativa Nº 652, de 9 de dezembro de 2003**, Brasília. 2003. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/leitura/\\_arquivo/arquivos/res2003652.pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/leitura/_arquivo/arquivos/res2003652.pdf)>. Acesso em: 20 Jul. 2020.
- ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional–PRODIST**, Brasília. 2016. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/prodist.>>. Acesso em: 25 Jul. 2020.
- ANEEL. **Geração Distribuída**, Brasília. 2018. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 25 Jul. 2020.
- ANEEL. **Informações Gerenciais**, Brasília. 2019. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/informacoes-gerenciais>>. Acesso em: 20 Jul. 2020.
- BARKER, P. P.; MELLO, R. W. D. Determining the impact of distributed generation on power systems. i. radial distribution systems. In: IEEE. **2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No. 00CH37134)**. [S.l.], 2000. v. 3, p. 1645–1656.
- BERNARDES, H. R. S. **Deteção e classificação de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica usando a análise multirresolução e a rede neural artificial ARTMAP-fuzzy** 2019. 94 f. 1-94 p. Dissertação ( Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"– UNESP, Ilha Solteira, 2019.
- BÍSCARO, A.; PEREIRA, R.; KEZUNOVIC, M.; MANTOVANI, J. Integrated fault location and power-quality analysis in electric power distribution systems. **IEEE Transactions on power delivery**, IEEE, v. 31, n. 2, p. 428–436, 2015.
- BRAGA JR, R. A. **Mini e Micro Centrais Hidroelétricas**. Uel. Londrina: [s.n.], 1999. 68 p.
- BRETAS, A. S.; PIRES, L.; MORETO, M.; SALIM, R. H. A bp neural network based technique for hif detection and location on distribution systems with distributed generation. **International Conference on Intelligent Computing**, Springer, p. 608–613, 2006.
- CARPENTER, G. A.; GROSSBERG, S. A massively parallel architecture for a self-organizing neural pattern recognition machine. **Computer vision, graphics, and image processing**, Academic Press, v. 37, n. 1, p. 54–115, 1987.
- CARPENTER, G. A.; GROSSBERG, S. The art of adaptive pattern recognition by a self-organizing neural network. **Computer**, IEEE, v. 21, n. 3, p. 77–88, 1988.

- CARPENTER, G. A.; GROSSBERG, S. A self-organizing neural network for supervised learning, recognition, and prediction. **IEEE Communications Magazine**, IEEE, v. 30, n. 9, p. 38–49, 1992.
- CARPENTER, G. A.; GROSSBERG, S.; MARKUZON, N.; REYNOLDS, J. H.; ROSEN, D. B. et al. Fuzzy artmap: A neural network architecture for incremental supervised learning of analog multidimensional maps. **IEEE Transactions on neural networks**, v. 3, n. 5, p. 698–713, 1992.
- CARPENTER, G. A.; GROSSBERG, S.; REYNOLDS, J. H. et al. Artmap: Supervised real-time learning and classification of nonstationary data by a self-organizing neural network. **Neural networks**, Boston, v. 4, n. 5, p. 565–588, 1991.
- CARPENTER, G. A.; GROSSBERG, S.; ROSEN, D. B. Fuzzy art: Fast stable learning and categorization of analog patterns by an adaptive resonance system. **Neural networks**, Elsevier, v. 4, n. 6, p. 759–771, 1991.
- CHAITANYA, B. K.; YADAV, A. An intelligent fault detection and classification scheme for distribution lines integrated with distributed generators. **Computers & Electrical Engineering**, Elsevier, v. 69, p. 28–40, 2018.
- DAUBECHIES, I. Orthonormal bases of compactly supported wavelets. **Communications on pure and applied mathematics**, Wiley Online Library, v. 41, n. 7, p. 909–996, 1988.
- DAUBECHIES, I. **Ten lectures on wavelets**. [S.l.]: SIAM, 1992.
- DECANINI, J.; TONELLI-NETO, M.; MINUSSI, C. Robust fault diagnosis in power distribution systems based on fuzzy artmap neural network-aided evidence theory. **IET Generation, Transmission & Distribution**, IET, v. 6, n. 11, p. 1112–1120, 2012.
- DEHGHANI, M.; KHOOBAN, M. H.; NIKNAM, T. fault detection and classification based on a combination of wavelet singular entropy theory and fuzzy logic in distribution lines in the presence of distributed generations. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier, v. 78, p. 455–462, 2016.
- DELMONT FILHO, O. **Um algoritmo para detecção, localização e classificação de distúrbios na qualidade da energia elétrica utilizando a transformada wavelet**. 1–209 p. Tese (Doutorado) — Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2007.
- EL-ZONKOLY, A. M. Fault diagnosis in distribution networks with distributed generation. **Electric Power Systems Research**, Elsevier, v. 81, n. 7, p. 1482–1490, 2011.
- ELTAWIL, M. A.; ZHAO, Z. Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems—a review. **Renewable and sustainable energy reviews**, Elsevier, v. 14, n. 1, p. 112–129, 2010.
- EPE. **Energia renovável, Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar , Oceânica**. Tolmasquim. TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno.: [s.n.], 2016. 452 p. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-172/EnergiaRenovavel-Online16maio2016>>. Acesso em: 30 Jul. 2020.

- FLÓREZ, R. O. **Pequenas centrais hidrelétricas**. [S.l.]: São Paulo: Oficina de Textos, 2014.
- GADANAYAK, D. A.; MALLICK, R. K. Interharmonics based high impedance fault detection in distribution systems using maximum overlap wavelet packet transform and a modified empirical mode decomposition. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier, v. 112, p. 282–293, 2019.
- GÖNEN, T. **Electric power distribution system engineering**. [S.l.]: CRC press Boca Raton, 2008. v. 2.
- GONEN, T. **Electric Power Distribution Engineering**, Third Edition. Taylor & Francis, 2014.
- GROSSBERG, S. Adaptive pattern classification and universal recoding: Ii. feedback, expectation, olfaction, illusions. **Biological cybernetics**, Springer, v. 23, n. 4, p. 187–202, 1976.
- GROSSBERG, S. Adaptive resonance theory: How a brain learns to consciously attend, learn, and recognize a changing world. **Neural Networks**, Elsevier, v. 37, p. 1–47, 2013.
- GURURAJAPATHY, S.; MOKHLIS, H.; ILLIAS, H. A. Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: A review. **Renewable and sustainable energy reviews**, Elsevier, v. 74, p. 949–958, 2017.
- HUNG, D. Q.; MITHULANANTHAN, N.; BANSAL, R. C. Analytical expressions for DG allocation in primary distribution networks. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 25, n. 3, p. 814–820, 2010.
- IEE. **IEEE Guide for Conducting Distribution Impact Studies for Distributed Resource Interconnection**. New York, USA: IEEE, 2013. 1–137 p. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/6748837>>. Acesso em: 10 Ago. 2020.
- IEEE. **IEEE PES Distribution System Analysis.(2010) Distribution System Analysis Subcommittee**. 2010. Disponível em: <<https://site.ieee.org/pes-testfeeders/resources>>. Acesso em: 17 Ago. 2020.
- IEEE. **IEEE Guide for Identifying and Improving Voltage Quality in Power Systems. IEEE Std 1250-2011 (Revision of IEEE Std 1250-1995)**, p. 1–70, 2011.
- KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. D.; ROBBA, E. J. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**. [S.l.]: Editora Blucher, 2005.
- KARIMI, M.; MOKHLIS, H.; NAIDU, K.; UDDIN, S.; BAKAR, A. H. Photovoltaic penetration issues and impacts in distribution network - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 53, p. 594–605, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.042>>. Acesso em: 25 Ago. 2020.
- KIM, C. H.; AGGARWAL, R. Wavelet transforms in power systems. part 1: General introduction to the wavelet transforms. **Power Engineering Journal**, IET, v. 14, n. 2, p. 81–87, 2000.

- KIM, C. H.; AGGARWAL, R. Wavelet transforms in power systems. ii. examples of application to actual power system transients. **Power Engineering Journal**, IET, v. 15, n. 4, p. 193–202, 2001.
- LAGE, E. S.; PROCESSI, L. D. Panorama do setor de energia eólica. **Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social**, p. 183–206, 2013.
- LAI, T.; SNIDER, L.; LO, E. Wavelet transform based relay algorithm for the detection of stochastic high impedance faults. **Electric power systems research**, Elsevier, v. 76, n. 8, p. 626–633, 2006.
- LEDESMA, J. J. G.; NASCIMENTO, K. B. do; ARAUJO, L. R. de; PENIDO, D. R. R. A two-level ann-based method using synchronized measurements to locate high-impedance fault in distribution systems. **Electric Power Systems Research**, Elsevier, v. 188, p. 106576, 2020.
- LOPES, M. **Desenvolvimento de redes neurais para previsão de cargas elétricas de sistemas de energia elétrica**. 2005. 169 f. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia-Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP). Ilha Solteira, São Paulo, 2005.
- MALLAT, S. **A Wavelet Tour of Signal Processing: The Sparce Way**. AP Professional, Third Edition, London, 2009.
- MALLAT, S. G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. **IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence**, Ieee, v. 11, n. 7, p. 674–693, 1989.
- MARCHIORI, S. **Desenvolvimento de um sistema para análise da estabilidade transitória de sistemas de energia elétrica via redes neurais**. 2006. 130 f. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia-Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. UNESP. Ilha Solteira, 2006.
- MISITI, M.; MISITI, Y.; OPPENHEIM, G.; POGGI, J. **Matlab wavelet toolbox user\’s guide. version 3**. [S.l.: s.n.], 2004. v. 1. 1–360 p.
- MOTTER, D.; VIEIRA, J. C. de M. The setting map methodology for adjusting the dg anti-islanding protection considering multiple events. **IEEE Transactions on Power Delivery**, IEEE, v. 33, n. 6, p. 2755–2764, 2018.
- OLESKOVICZ, M.; COURY, D. V.; FELHO, O. D.; USIDA, W. F.; CARNEIRO, A. A.; PIRES, L. R. Power quality analysis applying a hybrid methodology with wavelet transforms and neural networks. **International journal of electrical power & Energy systems**, Elsevier, v. 31, n. 5, p. 206–212, 2009.
- ONS. “**O Sistema Interligado Nacional**”. 2020. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>.
- OPPENHEIM, A. V.; BUCK, J. R.; SCHAFER, R. W. **Discrete-time signal processing**. [S.l.]: Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998.
- PERCIVAL, D. B.; WALDEN, A. T. **Wavelet methods for time series analysis**. [S.l.]:

Cambridge university press, 2000. v. 4.

PINTO, M. O. **Energia elétrica: geração, transmissão e sistemas interligados**. [S.l.]: Rio de Janeiro: LTC, 2014.

POLIZEL, L. H. **Metodologia de Prospecção e Avaliação de Pré-Viabilidade Expedita de Geração Distribuída ( GD ): Caso Eólico e Hidráulico**. 138 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP, 2007.

RAZAVI, S.-E.; RAHIMI, E.; JAVADI, M. S.; NEZHAD, A. E.; LOTFI, M.; SHAFIE-KHAH, M.; CATALÃO, J. P. Impact of distributed generation on protection and voltage regulation of distribution systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 105, p. 157–167, 2019.

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

SANTOS, A.; BERNARDES, H.; FARIA, L.; LOPES, M.; MINUSSI, C. Detecção e classificação de faltas de curto-circuito em sistemas de distribuição de energia elétrica com inserção de geração distribuída. In: **XXIII Congresso Brasileiro de Automática (XXIII CBA)**, Congresso Virtual, Brasil, CBA, v. 1, n. 6, 2020.

SATO, F.; FREITAS, W. **Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica**. [S.l.]: Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

SHILLER, S. High impedance fault arcing on sandy soil in 15kv distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 5, n. 2, 1990.

STRANG, G.; NGUYEN, T. **Wavelets and filter banks**. [S.l.]: SIAM, 1996.

TONHA, H. M. **Análise da geração distribuída sob a perspectiva de maximização de potência injetada em sistemas de distribuição** 2017. 120 f. 1-120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — "Universidade Federal de Goiás"– UFG, Goiânia, 2017.

UPADHYAYA, S.; MOHANTY, S. Localization and classification of power quality disturbances using maximal overlap discrete wavelet transform and data mining based classifiers. **IFAC-PapersOnLine**, Elsevier, v. 49, n. 1, p. 437–442, 2016.

WESTER, C. G. High impedance fault detection on distribution systems. In: IEEE. 1998 **Rural Electric Power Conference Presented at 42nd Annual Conference**. [S.l.], 1998. p. c5–1.

XUAN, L.; BIN, S. Microgrids - An integration of renewable energy technologies. 2008 **China International Conference on Electricity Distribution, CIGRE 2008**, 2008.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and control**, Elsevier, v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965.

ZANJANI, M. G. M.; KARGAR, H. K.; ZANJANI, M. G. M. High impedance fault detection

---

of distribution network by phasor measurement units. In: IEEE. 2012 **Proceedings of 17th Conference on Electrical Power Distribution**. [S.l.], 2012. p. 1–5.

ZHU, L.; WANG, Y.; FAN, Q. Modwt-arma model for time series prediction. **Applied Mathematical Modelling**, Elsevier, v. 38, n. 5-6, p. 1859–1865, 2014.

## APÊNDICE A - SISTEMA TESTE IEEE-34 BARRAS

Dados do alimentar real de distribuição localizado no estado do Arizona, EUA, com tensão nominal de 24 kV. Abaixo enumeram-se suas principais características:

- 1 . Alimentador longo levemente carregado;
- 2 . Possui dois reguladores de tensão;
- 3 . Um transformador em linha que reduz a tensão de 24 kV para 4,16 kV;
- 4 . Carregamento desequilibrado, com cargas pontuais e distribuídas . Assume-se que as cargas distribuídas são conectadas no centro do seguimento da linha;
- 5 . Capacitores *shunt*;

Na Tabela 12 são apresentados os dados dos bancos de capacitores localizados nas barras 844 e 848. Os dados dos transformadores são apresentados na Tabela 13. Os dados de linhas são mostrados na Tabela 14.

Tabela 12 - Dados bancos de capacitores.

| Nó    | Fase-A | Fase-B | Fase-C |
|-------|--------|--------|--------|
|       | kVAr   | kVAr   | kVAr   |
| 844   | 100    | 100    | 100    |
| 848   | 150    | 150    | 150    |
| Total | 250    | 250    | 250    |

Fonte: adaptado de IEEE (2010).

Tabela 13 - Dados dos transformadores.

|            | kVA  | kV-Alta     | kV-Baixa     | R - % | X - % |
|------------|------|-------------|--------------|-------|-------|
| Subestação | 2500 | 69 - D      | 24.9 -Gr. W  | 1     | 8     |
| XFM -1     | 500  | 24.9 - Gr.W | 4.16 - Gr. W | 1,9   | 4,08  |

Fonte: adaptado de IEEE (2010).

Tabela 14 - Dados de linhas.

| Nó A | Nó B | Comp. [m] | Config. |
|------|------|-----------|---------|
| 800  | 802  | 786,35    | 300     |
| 802  | 806  | 527,28    | 300     |
| 806  | 808  | 9823,22   | 300     |
| 808  | 810  | 1768,97   | 303     |
| 808  | 812  | 11429,44  | 300     |
| 812  | 814  | 9061,26   | 300     |
| 814  | 850  | 3,05      | 301     |
| 816  | 818  | 521,18    | 302     |
| 816  | 824  | 3111,86   | 301     |
| 818  | 820  | 14675,40  | 302     |
| 820  | 822  | 4187,75   | 302     |
| 824  | 826  | 923,50    | 303     |
| 824  | 828  | 256,02    | 301     |
| 828  | 830  | 6229,81   | 301     |
| 830  | 854  | 158,49    | 301     |
| 832  | 858  | 1493,45   | 301     |
| 832  | 888  | 0,00      | XFM-1   |
| 834  | 860  | 615,67    | 301     |
| 834  | 842  | 85,34     | 301     |
| 836  | 840  | 262,12    | 301     |
| 836  | 862  | 85,34     | 301     |
| 842  | 844  | 411,46    | 301     |
| 844  | 846  | 1109,42   | 301     |
| 846  | 848  | 161,54    | 301     |
| 850  | 816  | 94,48     | 301     |
| 852  | 832  | 3,05      | 301     |
| 854  | 856  | 7110,64   | 303     |
| 854  | 852  | 11225,24  | 301     |
| 858  | 864  | 493,75    | 302     |
| 858  | 834  | 1776,90   | 301     |
| 860  | 836  | 816,82    | 301     |
| 862  | 838  | 1481,26   | 304     |
| 888  | 890  | 3218,53   | 300     |

Fonte: adaptado (IEEE, 2010).

Tabela 15 - Configuração das linhas de distribuição.

| Configuração | condutores presentes | Tipo de condutor fase | Tipo de condutor Neutro | Tipo de Poste |
|--------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|---------------|
|              |                      | ACSR                  | ACSR                    |               |
| 300          | B A C N              | 1/0                   | 1/0                     | 500           |
| 301          | B A C N              | #2 6/1                | #2 6/1                  | 500           |
| 302          | A N                  | #4 6/1                | #4 6/1                  | 510           |
| 303          | B N                  | #4 6/1                | #4 6/1                  | 510           |
| 304          | B N                  | #2 6/1                | #2 6/1                  | 510           |

Fonte: adaptado IEEE (2010).

Tabela 16 - Cargas concentradas.

| Nó    | Fase- A | Fase -A | Fase- B | Fase -B | Fase -C | Fase -C |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|       | kW      | kVAr    | kW      | kVAr    | kW      | kVAr    |
| 860   | 20      | 16      | 20      | 16      | 20      | 16      |
| 840   | 9       | 7       | 9       | 7       | 9       | 7       |
| 844   | 135     | 105     | 135     | 105     | 135     | 105     |
| 848   | 20      | 16      | 20      | 16      | 20      | 16      |
| 890   | 150     | 75      | 150     | 75      | 150     | 75      |
| 830   | 10      | 5       | 10      | 5       | 25      | 10      |
| Total | 344     | 224     | 344     | 224     | 359     | 229     |

Fonte: adaptado IEEE (2010).

As configurações dos cabos das linhas de distribuição são mostradas na Tabela 15. Enquanto nas Tabelas 16 e 17 são apresentados as potências reativa e ativa das cargas concentradas e distribuídas do sistema.

$$Z_{300} = \begin{vmatrix} 1,3368 + 1,3343 & 0,2101 + j0,5779 & 0,2130 + j0,5015 \\ 0,2101 + j0,5779 & 1,3238 + j1,3569 & 0,2066 + j0,4591 \\ 0,2130 + j0,5015 & 0,2066 + j0,4591 & 1,3294 + j1,3471 \end{vmatrix} \quad (46)$$

Tabela 17 - Cargas distribuídas.

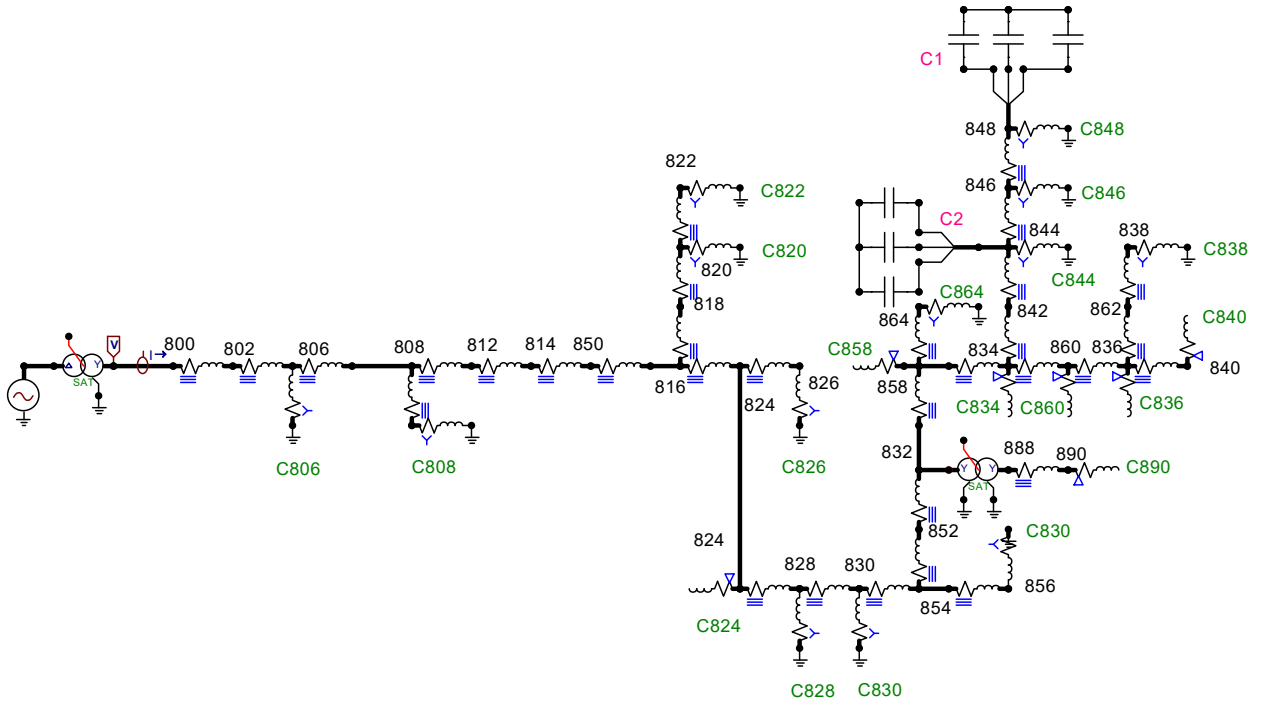
| Nó    | No  | Fase A | Fase A | Fase B | Fase B | Fase C | Fase C |
|-------|-----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| A     | B   | kW     | kVAr   | kW     | kVAr   | kW     | kVAr   |
| 802   | 806 | 0      | 0      | 30     | 15     | 25     | 14     |
| 808   | 810 | 0      | 0      | 16     | 8      | 0      | 0      |
| 818   | 820 | 34     | 17     | 0      | 0      | 0      | 0      |
| 820   | 822 | 135    | 70     | 0      | 0      | 0      | 0      |
| 816   | 824 | 0      | 0      | 5      | 2      | 0      | 0      |
| 824   | 826 | 0      | 0      | 40     | 20     | 0      | 0      |
| 824   | 828 | 0      | 0      | 0      | 0      | 4      | 2      |
| 828   | 830 | 7      | 3      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| 854   | 856 | 0      | 0      | 4      | 2      | 0      | 0      |
| 832   | 858 | 7      | 3      | 2      | 1      | 6      | 3      |
| 858   | 864 | 2      | 1      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| 858   | 834 | 4      | 2      | 15     | 8      | 13     | 7      |
| 834   | 860 | 16     | 8      | 20     | 10     | 110    | 55     |
| 860   | 836 | 30     | 15     | 10     | 6      | 42     | 22     |
| 836   | 840 | 18     | 9      | 22     | 11     | 0      | 0      |
| 862   | 838 | 0      | 0      | 28     | 14     | 0      | 0      |
| 842   | 844 | 9      | 5      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| 844   | 846 | 0      | 0      | 25     | 12     | 20     | 11     |
| 846   | 848 | 0      | 0      | 23     | 11     | 0      | 0      |
| Total |     | 262    | 133    | 240    | 120    | 220    | 114    |

Fonte: adaptado de IEEE (2010).

As matrizes de impedâncias dos cabos 300 e 301 são apresentadas em (46) e (47).

$$Z_{301} = \begin{vmatrix} 1,93 + j1,4115 & 0,2327 + j0,6442 & 0,2359 + j0,5691 \\ 0,2327 + j0,6442 & 1,9157 + j1,4281 & 0,2288 + j0,5238 \\ 0,2359 + j0,5691 & 0,2288 + j0,5238 & 1,9219 + j1,4209 \end{vmatrix} \quad (47)$$

Figura 40 - Sistema teste IEEE-34 nós balanceado ATPDraw.



Fonte: elaboração da própria autora.

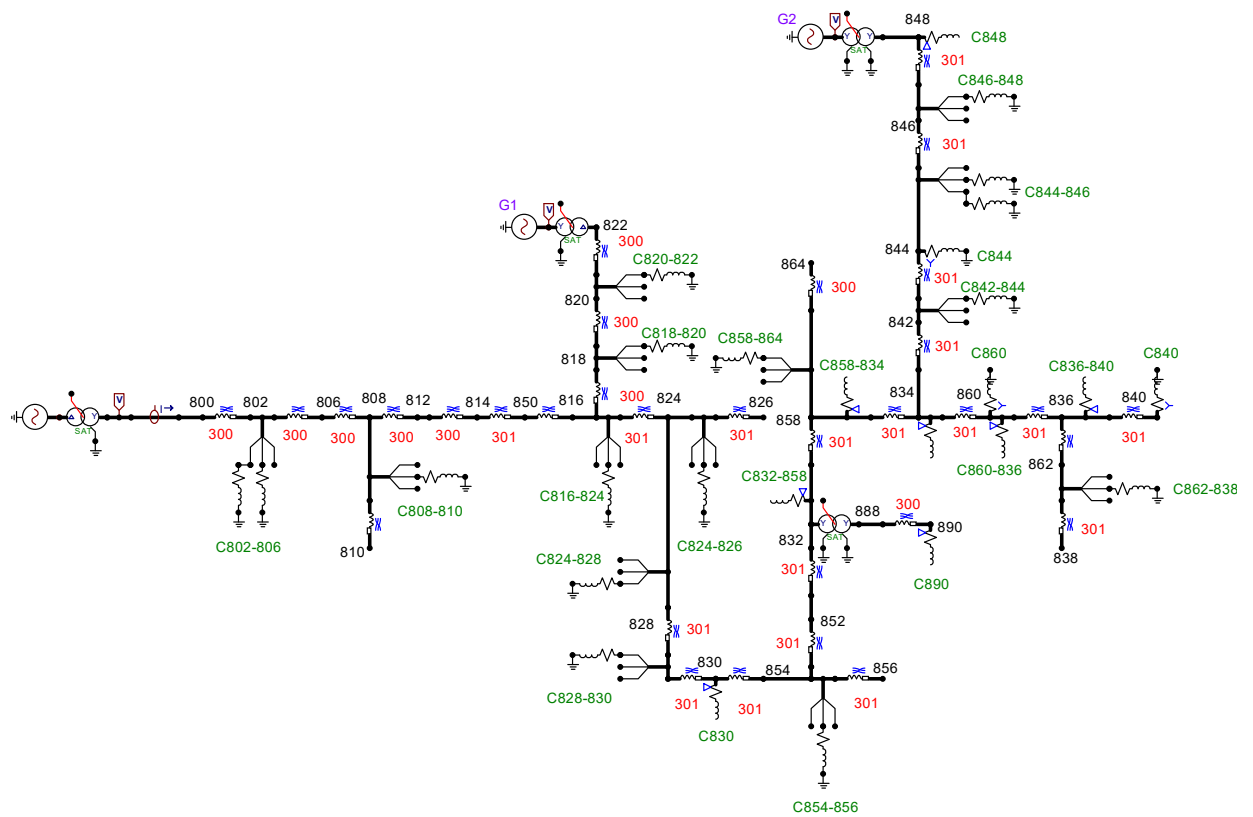
Em (48) e (49) apresenta-se as matrizes de susceptância em micro Siemens por milha dos cabos 300 e 301.

$$B_{300} = \begin{vmatrix} j5,3350 & -j1,5313 & -j0,9943 \\ -j1,5313 & j5,0979 & j-0,6212 \\ -j0,9943 & -j0,6212 & j4,8880 \end{vmatrix} \quad (48)$$

$$B_{301} = \begin{vmatrix} j5,1207 & -j1,4364 & -j0,9402 \\ -j1,4364 & j4,9055 & -j0,5951 \\ -j0,9402 & -j0,5951 & j4,7154 \end{vmatrix} \quad (49)$$

Na Figura 42 apresenta-se o relatório de classificação dos curtos-circuitos emitidos no MATLAB. Neste relatório, é apresentado o tipo de curto, fases envolvidas, tipo de falta (FAI ou FBI), e se existe conexão com a terra.

Figura 41 - Sistema teste IEEE-34 nós desbalanceado ATPDraw.



Fonte: elaboração da própria autora.

Figura 42 - Relatório de classificação: curto-circuito bifásico cenário 4.

| RELATÓRIO DE CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS DE CURTO-CIRCUITO |        |        |        |                |       |               |
|--------------------------------------------------------|--------|--------|--------|----------------|-------|---------------|
| n_tes                                                  | Fase A | Fase B | Fase C | Curto-Circuito | Falta | conexão-Terra |
| 1                                                      | Normal | Falta  | Falta  | Bifasico       | FAI   | SIM           |
| 2                                                      | Falta  | Falta  | Normal | Bifasico       | FAI   | SIM           |
| 3                                                      | Normal | Normal | Normal | Sem Curto      | FAI   | SIM           |
| 4                                                      | Normal | Falta  | Falta  | Bifasico       | FAI   | SIM           |
| 5                                                      | Normal | Normal | Normal | Sem Curto      | FAI   | SIM           |
| 6                                                      | Normal | Normal | Normal | Sem Curto      | FAI   | SIM           |
| 7                                                      | Normal | Falta  | Falta  | Bifasico       | FAI   | SIM           |
| 8                                                      | Normal | Falta  | Falta  | Bifasico       | FAI   | SIM           |
| 9                                                      | Normal | Normal | Normal | Sem Curto      | FAI   | SIM           |
| 10                                                     | Normal | Normal | Normal | Sem Curto      | FAI   | SIM           |
| 11                                                     | Normal | Normal | Normal | Sem Curto      | FAI   | SIM           |
| 12                                                     | Normal | Normal | Normal | Sem Curto      | FAI   | SIM           |
| 13                                                     | Falta  | Normal | Falta  | Bifasico       | FAI   | SIM           |
| 14                                                     | Normal | Falta  | Falta  | Bifasico       | FAI   | SIM           |
| 15                                                     | Normal | Falta  | Falta  | Bifasico       | FAI   | SIM           |
| 16                                                     | Falta  | Falta  | Normal | Bifasico       | FAI   | SIM           |
| 17                                                     | Normal | Falta  | Falta  | Bifasico       | FAI   | SIM           |
| 18                                                     | Normal | Falta  | Falta  | Bifasico       | FAI   | SIM           |
| 19                                                     | Falta  | Normal | Falta  | Bifasico       | FAI   | SIM           |
| 20                                                     | Normal | Normal | Normal | Sem Curto      | FAI   | SIM           |
| 21                                                     | Falta  | Falta  | Normal | Bifasico       | FAI   | SIM           |
| 22                                                     | Normal | Normal | Normal | Sem Curto      | FAI   | SIM           |
| 23                                                     | Falta  | Normal | Falta  | Bifasico       | FAI   | SIM           |
| 24                                                     | Normal | Falta  | Falta  | Bifasico       | FAI   | SIM           |
| 25                                                     | Normal | Normal | Normal | Sem Curto      | FBI   | NÃO           |
| 26                                                     | Falta  | Falta  | Normal | Bifasico       | FBI   | NÃO           |
| 27                                                     | Normal | Falta  | Falta  | Bifasico       | FBI   | NÃO           |
| 28                                                     | Normal | Falta  | Falta  | Bifasico       | FBI   | NÃO           |
| 29                                                     | Normal | Falta  | Falta  | Bifasico       | FBI   | NÃO           |
| 30                                                     | Falta  | Falta  | Normal | Bifasico       | FBI   | NÃO           |
| 31                                                     | Falta  | Falta  | Normal | Bifasico       | FBI   | NÃO           |
| 32                                                     | Normal | Normal | Normal | Sem Curto      | FBI   | NÃO           |
| 33                                                     | Normal | Falta  | Falta  | Bifasico       | FBI   | NÃO           |
| 34                                                     | Falta  | Falta  | Normal | Bifasico       | FBI   | NÃO           |
| 35                                                     | Normal | Falta  | Falta  | Bifasico       | FBI   | NÃO           |
| 36                                                     | Normal | Normal | Normal | Sem Curto      | FBI   | NÃO           |
| 37                                                     | Normal | Normal | Normal | Sem Curto      | FAI   | SIM           |
| 38                                                     | Normal | Falta  | Falta  | Bifasico       | FAI   | SIM           |
| 39                                                     | Normal | Falta  | Falta  | Bifasico       | FAI   | SIM           |

```

=====
RELATÓRIO DE TREINAMENTO E DIAGNÓSTICO-ARTMAP FUZZY
=====
Total Acertos: 90 (100.00%)
Tempo Computacional: 2.1 s
Epocas: 1
Número de amostras: 300 Amostras
Diagnóstico: 90 amostras (30%) do conjunto de amostras
Treinamento: 210 amostras (70%) do conjunto de amostras
Tipo de Curto: Bifásico
=====

```

Fonte: elaboração da própria autora.