

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Kelvin Bryan do Nascimento

**Aplicações de redes neurais artificiais na detecção e identificação de faltas
monofásicas em sistemas de distribuição**

Juiz de Fora

2020

Kelvin Bryan do Nascimento

**Aplicações de redes neurais artificiais na detecção e identificação de faltas
monofásicas em sistemas de distribuição**

Dissertação apresentada ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, na área de concentração em Sistemas de Energia Elétrica, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadora: D. Sc. Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo

Coorientador: D. Sc. Leandro Ramos de Araujo

Juiz de Fora

2020

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Nascimento, Kelvin Bryan do.

Aplicações de redes neurais artificiais na detecção e identificação de faltas monofásicas em sistemas de distribuição / Kelvin Bryan do Nascimento. -- 2020.

132 p.

Orientadora: Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo

Coorientador: Leandro Ramos de Araujo

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2020.

1. Faltas de alta impedância. 2. Defeitos de abertura de condutores. 3. Defeitos simultâneos. 4. Sistemas de distribuição de energia. 5. Redes neurais artificiais. I. Araujo, Débora Rosana Ribeiro Penido, orient. II. Araujo, Leandro Ramos de, coorient. III. Título.

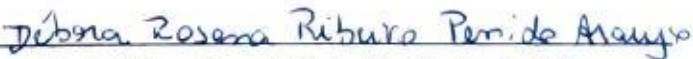
Kelvin Bryan do Nascimento

APLICAÇÃO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS NA DETECÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DE FALTAS
MONOFÁSICAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

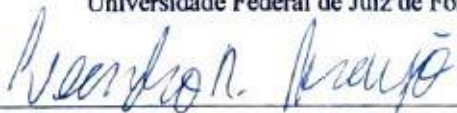
Dissertação apresentada ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, na área de concentração em Sistemas de Energia Elétrica, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 19/02/2020


BANCA EXAMINADORA:



Prof. Débora Rosana Ribeiro Penido Araujo, D. Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora



Prof. Leandro Ramos de Araujo, D. Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora



Prof. Igor Delgado de Melo, D. Sc.
Universidade Federal de Juiz de Fora



Prof. Felipe Gomes Duque, D. Sc.
Instituto Federal SUDESTE MG

Dedico este trabalho aos meus falecidos avôs Manoel, Luiz e Francisco que sempre me apoiaram e tenho certeza que continuam olhando por mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus que me fortalece e me ilumina todos os dias da minha vida. Agradeço também à nossa senhora Aparecida a quem tenho muita devoção e acredito que está sempre me protegendo e guiando no caminho da justiça.

Agradeço também aos meus pais, que sempre me apoiaram e me deram todos os subsídios necessários para que eu realizasse meus estudos. Agradeço pelo amor e carinho que sempre tiveram comigo e por estarem sempre ao meu lado em todas as caminhadas da vida.

Agradeço também à minha namorada Larissa, que sempre me deu apoio e bons conselhos quando eu precisei, me fortalecendo sempre mais.

Agradeço também a todos os demais familiares que sempre estiveram por perto, em todas as ocasiões, mesmo quando eu não podia dar muita atenção. Agradeço também à todos os meus amigos, principalmente aqueles que estavam sempre perto, mesmo quando eu não conseguia dispor minha completa atenção.

Agradeço também, com especial carinho, aos meus orientadores Débora e Leandro que sempre me conduziram muito bem no caminho das pesquisas e sempre souberam retirar o melhor de mim com seus valiosos ensinamentos.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Juiz de Fora, as agências de fomento para pesquisas e ao povo brasileiro em geral. Todos de alguma maneira contribuíram para que eu pudesse me dedicar a este trabalho.

RESUMO

Neste trabalho são desenvolvidos métodos de detecção e identificação de defeitos em sistemas de distribuição radiais utilizando redes neurais artificiais. Vários tipos de defeitos monofásicos foram estudados, tais como: defeitos de contato com alta impedância, defeitos de abertura de condutores e defeitos simultâneos. Primeiramente, cada um desses tipos de defeitos foi analisado separadamente em um sistema teste. O objetivo foi determinar as melhores formas para detectá-los. As simulações computacionais foram realizadas com a comunicação entre o Matlab e o OpenDSS e foram divididas em duas categorias. A primeira categoria utiliza informações de correntes oriundas de medidores alocados no sistema como dados de entrada das redes neurais para detecção e identificação de cada um dos tipos de defeitos tratados neste trabalho. Nas simulações dessa categoria, o objetivo principal foi analisar o impacto do número de medidores e do tipo de medição nos resultados das redes neurais. Quando mais de um medidor foi alocado, realizou-se a divisão do sistema em áreas de detecção. Essa divisão pode apresentar um maior custo de implantação e até de processamento computacional, porém facilita no processo de localização do defeito, já que diminui a área de busca, ou seja, a área onde o defeito pode ter ocorrido. A segunda categoria das simulações computacionais utiliza informações de tensões nas barras terminais como dados de entrada de redes neurais para detecção de defeitos de abertura ou simultâneos em áreas predefinidas. A detecção dos defeitos ocorreu separadamente para cada fase do sistema, isto é, cada rede neural criada detectava defeitos em uma determinada área de uma determinada fase do sistema utilizado. Os resultados computacionais de ambas as categorias foram bons, mostrando a robustez das estruturas de redes neurais desenvolvidas. Neste trabalho também foram realizadas simulações em tempo real para testes mais realistas das redes neurais. Para isso, utilizou-se o dispositivo dSPACE para modelagem das redes neurais e o RTDS para simulação do sistema de distribuição. Os resultados obtidos também foram bons, confirmando a robustez e mostrando a aplicação prática da técnica empregada.

Palavras Chave: Falhas de alta impedância. Defeitos de abertura de condutores. Defeitos simultâneos. Sistemas de distribuição de energia. Redes neurais artificiais. Simulações em tempo real.

ABSTRACT

In this work methods to detect and identify defects in radial distribution systems are developed using artificial neural networks. Several types of single-phase defects were studied, such as: high impedance defects, open-conductor defects and simultaneous defects. First of all, each of these types of defects were analysed separately in a trial system. The objective was to determine the best ways to detect them. Computational simulations were carried out with the communication between Matlab and OpenDSS and they were divided into two categories. The first category uses currents information from meters allocated in the system as input data for neural networks to detect and identify each one of the types of defects treated in this work. In simulations of this category, the main objective was to analyze the impact of the number of meters and the type of measurement on the neural networks results. When more than one meter was allocated, the system was divided into detection areas. This division may have a higher cost of implementation and even computational processing, but it facilitates the process of defects location because it reduces the search area, in other words, the area where the defect may have occurred. The second category of computer simulations uses voltage information of terminal buses as input data for neural networks for detection of opening or simultaneous defects in predefined areas. The detection of defects occurred separately for each phase of the system, that is, each neural network created detected defects in a certain area of a given phase of the system. The computational results of both categories were good, showing the robustness of the structures of neural networks developed. In this work, real-time simulations were also carried out to more realistic tests of the neural networks. For this, dSPACE device was used to model neural networks and the RTDS was used to simulate the distribution system. The results obtained were also good, showing the practical application and the robustness of the employed technique.

Keywords: High impedance faults. Open conductor defects. Simultaneous defects. Energy distribution systems. Artificial neural networks. Real time simulations.

LISTA DE ESQUEMAS

| | | |
|------------|---|-----|
| Esquema 1 | – Representação dos tipos de defeitos..... | 36 |
| Esquema 2 | – Defeito de contato | 40 |
| Esquema 3 | – Defeito de abertura | 43 |
| Esquema 4 | – Defeito simultâneo com contato pelo lado mais próximo à subestação de energia | 47 |
| Esquema 5 | – Defeito simultâneo com contato pelo lado mais próximo à carga | 47 |
| Esquema 6 | – Divisão em áreas | 54 |
| Esquema 7 | – Fluxograma da implementação proposta..... | 58 |
| Esquema 8 | – Fluxograma de construção da base de dados..... | 59 |
| Esquema 9 | – Fluxograma do bloco de redes neurais para detecção de defeitos..... | 63 |
| Esquema 10 | – Processo de aquisição de dados para treinamento das RNAs | 98 |
| Esquema 11 | – Funcionamento dos equipamentos em tempo real | 100 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|--|-----|
| Figura 1 | – Sistema teste de 4 barras | 37 |
| Figura 2 | – Divisão em áreas do sistema IEEE 34 barras | 53 |
| Figura 3 | – Sistema IEEE 13 barras | 67 |
| Figura 4 | – Sistema IEEE 34 barras | 68 |
| Figura 5 | – Divisão em áreas na fase A do sistema IEEE 34 barras | 92 |
| Figura 6 | – Divisão em áreas na fase B do sistema IEEE 34 barras | 93 |
| Figura 7 | – Divisão em áreas na fase C do sistema IEEE 34 barras | 94 |
| Figura 8 | – <i>Racks</i> RTDS do LABSIM | 96 |
| Figura 9 | – Dispositivo MicroAutoBox ou dSPACE do LABSIM..... | 97 |
| Figura 10 | – Disposição das RNAs no Simulink..... | 100 |
| Figura 11 | – Supervisório <i>RunTime</i> do RSCAD para faltas de alta impedância..... | 103 |
| Figura 12 | – Supervisório <i>RunTime</i> do RSCAD para defeitos de abertura..... | 104 |
| Figura 13 | – Supervisório <i>RunTime</i> do RSCAD para defeitos simultâneos | 105 |
| Figura 14 | – Arquitetura das redes neurais utilizadas para a detecção de defeitos | 106 |
| Figura 15 | – Arquitetura das redes neurais utilizadas para a identificação de defeitos..... | 107 |
| Figura 16 | – Característica do sinal de atuação e da corrente na fase A em situação de operação normal..... | 108 |
| Figura 17 | – Mudanças nas curvas do sinal de atuação e da corrente na fase A..... | 109 |
| Figura 18 | – Aproximação nas curvas do sinal de atuação e da corrente na fase A | 109 |
| Figura 19 | – Neurônio biológico | 118 |
| Figura 20 | – Neurônio artificial..... | 119 |
| Figura 21 | – Configuração de sistema para medição fasorial | 130 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | | |
|------------|--|----|
| Gráfico 1 | – Resultados obtidos para RNAs de detecção de faltas de alta impedância no sistema IEEE 13 barras | 74 |
| Gráfico 2 | – Resultados obtidos para RNAs de identificação de faltas de alta impedância no sistema IEEE 13 barras | 74 |
| Gráfico 3 | – Resultados obtidos pelas RNAs no sistema IEEE 34 barras com apenas um medidor alocado..... | 75 |
| Gráfico 4 | – Resultados obtidos pelas RNAs no sistema IEEE 34 barras com dois medidores..... | 76 |
| Gráfico 5 | – Resultados obtidos para defeitos de abertura no sistema IEEE 13 barras com apenas um medidor | 78 |
| Gráfico 6 | – Resultados obtidos para defeitos de abertura no sistema IEEE 13 barras com dois medidores..... | 78 |
| Gráfico 7 | – Resultados obtidos para defeitos de abertura no sistema IEEE 13 barras com três medidores..... | 79 |
| Gráfico 8 | – Resultados obtidos para defeitos de abertura no sistema IEEE 34 barras com apenas um medidor | 80 |
| Gráfico 9 | – Resultados obtidos para defeitos de abertura no sistema IEEE 34 barras com dois medidores..... | 80 |
| Gráfico 10 | – Resultados obtidos para defeitos de abertura no sistema IEEE 34 barras com três medidores..... | 81 |
| Gráfico 11 | – Resultados obtidos para defeitos simultâneos no sistema IEEE 13 barras com apenas um medidor | 83 |
| Gráfico 12 | – Resultados obtidos para defeitos simultâneos no sistema IEEE 13 barras com dois medidores | 84 |

| | | |
|------------|--|----|
| Gráfico 13 | – Resultados obtidos para defeitos simultâneos no sistema IEEE 13 barras com três medidores | 84 |
| Gráfico 14 | – Resultados obtidos para defeitos simultâneos no sistema IEEE 34 barras com apenas um medidor | 85 |
| Gráfico 15 | – Resultados obtidos para defeitos simultâneos no sistema IEEE 34 barras com dois medidores | 86 |
| Gráfico 16 | – Resultados obtidos para defeitos simultâneos no sistema IEEE 34 barras com três medidores | 86 |
| Gráfico 17 | – Resultados obtidos para a detecção de defeitos na fase A | 92 |
| Gráfico 18 | – Resultados obtidos para a detecção de defeitos na fase B | 93 |
| Gráfico 19 | – Resultados obtidos para a detecção de defeitos na fase C | 94 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|-----------|--|----|
| Tabela 1 | – Índices de DEC e FEC e compensações pagas pela CEMIG em Juiz de Fora em 2017 | 20 |
| Tabela 2 | – Índices de DEC e FEC e compensações pagas pela CEMIG em Juiz de Fora em 2018 | 21 |
| Tabela 3 | – Índices de DEC e FEC e compensações pagas pela CEMIG em Juiz de Fora em 2019 | 21 |
| Tabela 4 | – Resumo dos trabalhos revisados..... | 30 |
| Tabela 5 | – Dados referentes ao gerador equivalente do sistema base | 37 |
| Tabela 6 | – Dados referentes ao transformador abaixador da subestação do sistema base..... | 38 |
| Tabela 7 | – Dados referentes às cargas trifásicas desequilibradas do sistema teste..... | 38 |
| Tabela 8 | – Dados referentes à carga trifásica equilibrada do sistema teste | 39 |
| Tabela 9 | – Correntes aferidas na subestação do sistema teste em operação normal..... | 39 |
| Tabela 10 | – Tensões aferidas nos barramentos do sistema teste em operação normal | 39 |
| Tabela 11 | – Variação das correntes de acordo com a impedância de defeito | 41 |
| Tabela 12 | – Variação das correntes de acordo com aumentos de carregamento | 42 |
| Tabela 13 | – Dados obtidos na subestação para diferentes condições de defeitos de abertura no sistema teste..... | 44 |
| Tabela 14 | – Correntes aferidas na linha L2 para condições de defeito de abertura na linha L3 do sistema teste | 45 |
| Tabela 15 | – Tensões nas barras do sistema teste com aplicação de defeitos de abertura .. | 46 |
| Tabela 16 | – Dados obtidos referentes aos defeitos simultâneos com contato ao solo pelo lado mais próximo à subestação de energia | 49 |

| | | | |
|-----------|---|--|-----|
| Tabela 17 | – | Dados obtidos referentes aos defeitos simultâneos com contato ao solo pelo lado mais próximo às cargas | 50 |
| Tabela 18 | – | Tensões nas barras do sistema teste com aplicação de defeitos simultâneos . | 51 |
| Tabela 19 | – | Variações de correntes típicas em faltas de alta impedância..... | 56 |
| Tabela 20 | – | Valores limites de resistências de faltas de alta impedância para este trabalho..... | 57 |
| Tabela 21 | – | Informações gerais sobre as redes neurais definidas nos métodos de detecção com medição de correntes | 69 |
| Tabela 22 | – | Quantidade de neurônios na camada oculta das RNAs de detecção de defeitos com medições de correntes..... | 70 |
| Tabela 23 | – | Resultados das RNAs de detecção de defeitos de acordo com os índices de cálculo da eficiência | 72 |
| Tabela 24 | – | Resultados das RNAs de identificação de defeitos de acordo com os índices de cálculo da eficiência | 73 |
| Tabela 25 | – | Resumo da divisão em áreas por fase do sistema IEEE 34 barras | 90 |
| Tabela 26 | – | Informações gerais sobre as redes neurais definidas nos métodos de detecção com medição de correntes | 91 |
| Tabela 27 | – | Quantidade de neurônios na camada oculta das RNAs de detecção de defeitos com medições de tensão | 91 |
| Tabela 28 | – | Limites de variações nos carregamentos em barras do sistema IEEE 13 barras | 99 |
| Tabela 29 | – | Possíveis locais para ocorrência das faltas de alta impedância | 103 |
| Tabela 30 | – | Possíveis locais para ocorrência das faltas de abertura | 104 |
| Tabela 31 | – | Possíveis locais para ocorrência dos defeitos simultâneos..... | 105 |
| Tabela 32 | – | Informações sobre as redes neurais utilizadas nas simulações em tempo real | 106 |

| | | | |
|-----------|---|---|-----|
| Tabela 33 | – | Resultados dos testes em tempo real | 107 |
| Tabela 34 | – | Especificação dos pontos amostrados relacionados a atuação da rede neural | 110 |
| Tabela 35 | – | Tipos comuns de funções de ativação | 121 |
| Tabela 36 | – | Principais elementos que compõem os sistemas de distribuição | 124 |
| Tabela 37 | – | Funções ANSI com componentes de sequência..... | 132 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---------|---|
| AG | Algoritmo Genético |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| ANSI | <i>American National Standards Institute</i> |
| ATP | <i>Alternative Transient Program</i> |
| CEMIG | Companhia Energética de Minas Gerais |
| DA | Defeito de abertura |
| DEC | Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora |
| DIC | Duração de interrupção individual por unidade consumidora |
| DIL | Detecção, identificação e localização de faltas |
| FAI | Falta de alta impedância |
| FEC | Frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora |
| FIC | Frequência de interrupção individual por unidade consumidora |
| GD | Geração Distribuída |
| GPS | <i>Global positioning system</i> |
| IEEE | Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos |
| LABSIM | Laboratório de Simulações Multiplataformas |
| MATLAB | <i>Matrix Laboratory</i> |
| MG | <i>Microgrid</i> |
| MLP | <i>Multilayer Perceptron</i> |
| ONS | Operador Nacional do Sistema |
| OpenDSS | <i>Open Distribution System Simulator</i> |
| p.u. | Sistema por unidade |
| PRODIST | Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico |
| RTDS | <i>Real Time Digital Simulator</i> |
| RNA | Rede Neural Artificial |
| QEE | Qualidade da Energia Elétrica |
| SD | Sistema de Distribuição |
| SEP | Sistema Elétrico de Potência |

| | |
|------|--|
| SI | Sistema Industrial |
| ST | Sistema de Transmissão |
| SVM | Máquina de Vetores Suporte (do inglês: <i>Support Vector Machine</i>) |
| TC | Transformados de corrente |
| TDH | Taxa de distorção harmônica |
| TH | Transformada de <i>Hilbert</i> |
| TP | Transformador de potencial |
| TW | Transformada <i>Wavelet</i> |
| TWD | Transformada <i>Wavelet</i> discreta |
| UFJF | Universidade Federal de Juiz de Fora |
| UHE | Usina hidrelétrica |
| UTE | Usina termelétrica |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 19 |
| 1.1 | CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 19 |
| 1.2 | MOTIVAÇÃO | 22 |
| 1.3 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 24 |
| 1.3.1 | Faltas em derivação | 25 |
| 1.3.2 | Defeitos de abertura e simultâneos | 28 |
| 1.3.3 | Considerações sobre a revisão bibliográfica | 30 |
| 1.4 | OBJETIVOS | 33 |
| 1.5 | PUBLICAÇÕES DECORRENTES | 34 |
| 1.6 | ESTRUTURA DO TRABALHO | 34 |
| 2 | EMBASAMENTOS E PREMISAS PARA A DETECÇÃO DE DEFEITOS | 36 |
| 2.1 | CONSIDERAÇÕES INICIAIS | 36 |
| 2.2 | CARACTERÍSTICAS DOS DEFEITOS DE CONTATO..... | 40 |
| 2.3 | CARACTERÍSTICAS DOS DEFEITOS DE ABERTURA SEM CONTATO..... | 43 |
| 2.4 | CARACTERÍSTICAS DOS DEFEITOS SIMULTÂNEOS..... | 46 |
| 2.5 | CARACTERIZAÇÃO DOS DEFEITOS NOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO | 51 |
| 2.6 | DIVISÃO EM ÁREAS..... | 53 |
| 2.7 | PREMISSAS PARA OS TESTES DE DETECÇÃO DE DEFEITOS..... | 54 |
| 3 | IMPLEMENTAÇÃO DOS MÉTODOS DE DETECÇÃO E IDENTIFICAÇÃO | 58 |
| 3.1 | BLOCO A: BASE DE DADOS | 59 |
| 3.2 | BLOCO B: REDES NEURAIIS PARA DETECÇÃO DE FALTAS..... | 62 |
| 3.3 | BLOCO C: REDES NEURAIIS PARA IDENTIFICAÇÃO DA FASE SOB DEFEITO . | 66 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.4 | SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZADOS..... | 66 |
| 3.5 | CARACTERÍSTICAS DAS REDES NEURAIIS | 68 |
| 4 | APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE DETECÇÃO DE DEFEITOS COM MEDIÇÕES DE CORRENTE | 71 |
| 4.1 | FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA | 71 |
| 4.1.1 | Simulações no sistema IEEE 13 barras | 71 |
| 4.1.2 | Simulações no sistema IEEE 34 barras | 75 |
| 4.1.3 | Análise dos resultados obtidos..... | 76 |
| 4.2 | DEFEITOS DE ABERTURA..... | 77 |
| 4.2.1 | Simulações no sistema IEEE 13 barras | 77 |
| 4.2.2 | Simulações no sistema IEEE 34 barras | 79 |
| 4.2.3 | Análise dos resultados obtidos..... | 81 |
| 4.3 | DEFEITOS SIMULTÂNEOS | 82 |
| 4.3.1 | Simulações no sistema IEEE 13 barras | 82 |
| 4.3.2 | Simulações no sistema IEEE 34 barras | 85 |
| 4.3.3 | Análise dos resultados obtidos..... | 87 |
| 5 | APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE DETECÇÃO DE DEFEITOS DE ABERTURA E SIMULTÂNEOS COM MEDIÇÕES DE TENSÃO EM BARRAS TERMINAIS | 89 |
| 5.1 | CONCEITUAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO (BLOCO D) | 89 |
| 5.2 | CARACTERÍSTICAS DAS REDES NEURAIIS INTRODUZIDAS | 91 |
| 5.3 | DETECÇÃO DE DEFEITOS NA FASE A DO SISTEMA IEEE 34 BARRAS..... | 92 |
| 5.4 | DETECÇÃO DE DEFEITOS NA FASE B DO SISTEMA IEEE 34 BARRAS | 93 |
| 5.5 | DETECÇÃO DE DEFEITOS NA FASE C DO SISTEMA IEEE 34 BARRAS | 94 |
| 5.6 | ANÁLISE DOS RESULTADOS | 95 |
| 5.7 | CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMENTO..... | 95 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6 | SIMULAÇÕES NO RTDS..... | 96 |
| 6.1 | EQUIPAMENTOS UTILIZADOS | 96 |
| 6.2 | TREINAMENTO DAS REDES NEURAIAS | 98 |
| 6.3 | SIMULAÇÕES EM TEMPO REAL..... | 100 |
| 6.4 | COMUNICAÇÃO ENTRE OS EQUIPAMENTOS | 101 |
| 6.5 | CASO 1 – DEFEITOS EM DERIVAÇÃO | 102 |
| 6.6 | CASO 2 – DEFEITOS DE ABERTURA..... | 104 |
| 6.7 | CASO 3 – DEFEITOS SIMULTÂNEOS..... | 105 |
| 6.8 | REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS UTILIZADAS | 106 |
| 6.9 | RESULTADOS | 107 |
| 6.10 | TEMPO DE ATUAÇÃO DAS REDES NEURAIAS | 108 |
| 7 | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 111 |
| 7.1 | CONCLUSÕES | 111 |
| 7.2 | SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS | 113 |
| | REFERÊNCIAS..... | 114 |
| | APÊNDICE A - Redes neurais artificiais | 118 |
| | APÊNDICE B - Conceitos básicos do OpenDSS..... | 124 |
| | APÊNDICE C - Tipos de medições | 129 |

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são abordados conceitos importantes para a compreensão do trabalho.

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O sistema elétrico de potência (SEP) brasileiro é um dos maiores do mundo em questão territorial, o que traz grande complexidade e conseqüentemente grandes desafios para o setor elétrico. Uma subdivisão dos SEPs dá-se por sistemas de geração, transmissão e distribuição.

Os sistemas de geração no Brasil estão majoritariamente dispostos na forma de usinas hidrelétricas (UHEs) e usinas térmicas (UTEs). A maior parte dessas usinas despacham de maneira centralizada e fiscalizada por meio do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

As usinas hidrelétricas são as principais fontes de energia do país e encontram-se em dezesseis bacias hidrográficas localizadas em todo o território brasileiro e, muitas vezes, longe dos centros de carga do país. Sendo assim, essa energia gerada é transmitida a longas distâncias com tensões mais elevadas através das linhas de transmissão, que formam malhas ligando as diversas regiões brasileiras, permitindo a exploração dos diversos regimes hidrológicos das bacias e garantindo o atendimento do mercado com economicidade e segurança (ONS, 2019).

Os sistemas de distribuição são responsáveis por receber os grandes blocos de energia da transmissão e distribuir para os consumidores finais (normalmente residenciais, comerciais e industriais de pequeno porte) em níveis de tensões inferiores. Esses sistemas muitas vezes são extensos e conseqüentemente muito propícios à falhas, tanto por causas naturais, quanto por defeitos de equipamentos. Entre as causas naturais destacam-se a ação dos ventos, das chuvas ou de animais. Entre as falhas de equipamentos destacam-se os defeitos devido a falta de manutenção ou o esgotamento da vida útil e os defeitos externos, como perda de isolamento por exemplo.

Devido a grande importância no fornecimento da energia elétrica e os impactos das desenergizações, os defeitos, independente de sua origem, devem ser detectados e localizados o mais rápido possível, garantido vantagens tanto para os consumidores, quanto para as concessionárias de energia. As vantagens para os consumidores estão relacionadas

principalmente à segurança e ao bem estar, uma vez que estarão menos propícios ao risco de choque elétrico e sofrerão menores danos com a falta de energia, respectivamente. As vantagens para as concessionárias estão relacionadas à qualidade e a continuidade da energia entregue, que impactam diretamente em questões financeiras das empresas.

As concessionárias de energia são reguladas pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) por meio dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica (PRODIST). No módulo 8 do PRODIST são estabelecidos os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica (QEE), abordando a qualidade do produto e do serviço que deve ser prestado. No contexto da qualidade do serviço prestado são determinados alguns indicadores coletivos e individuais de continuidade. Os principais indicadores coletivos são o DEC (duração equivalente de interrupção por unidade consumidora) e o FEC (frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora).

Os indicadores são limitados pela ANEEL para cada subdivisão das distribuidoras, denominadas de Conjuntos Elétricos e, são apurados mensalmente, trimestralmente e anualmente para fiscalização da qualidade do serviço prestado. A Tabela 1, a Tabela 2 e a Tabela 3 exemplificam a evolução quanto ao desempenho da CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais) no que diz respeito ao atendimento da cidade de Juiz de Fora nos anos de 2017 a 2019 (ANEEL, 2019). As informações são referentes às apurações anuais realizadas pela ANEEL.

Tabela 1 – Índices de DEC e FEC e compensações pagas pela CEMIG em Juiz de Fora em 2017.

| Conjuntos Elétricos | Unidades Consumidoras | DEC | DEC Limite | FEC | FEC Limite | Compensações pagas |
|----------------------------|------------------------------|------------|-------------------|------------|-------------------|---------------------------|
| Juiz de Fora 1 | 85.777 | 11,54 | 11,00 | 5,66 | 8,00 | R\$ 256.635,43 |
| Juiz de Fora 2 | 111.625 | 4,13 | 5,00 | 2,36 | 6,00 | R\$ 139.517,09 |
| Juiz de Fora 4 | 75.604 | 4,35 | 6,00 | 2,23 | 6,00 | R\$ 107.006,70 |
| Santos Dumont | 27.423 | 10,02 | 13,00 | 3,94 | 8,00 | R\$ 59.232,68 |
| UH Marmelos | 38.587 | 15,05 | 13,00 | 8,19 | 9,00 | R\$ 199.367,82 |

Fonte: Retirado de ANEEL (2020).

Tabela 2 – Índices de DEC e FEC e compensações pagas pela CEMIG em Juiz de Fora em 2018.

| Conjuntos Elétricos | Unidades Consumidoras | DEC | DEC Limite | FEC | FEC Limite | Compensações pagas |
|----------------------------|------------------------------|------------|-------------------|------------|-------------------|---------------------------|
| Juiz de Fora 1 | 87.616 | 10,54 | 11,00 | 5,44 | 7,00 | R\$ 243.866,48 |
| Juiz de Fora 2 | 112.234 | 3,22 | 5,00 | 2,28 | 6,00 | R\$ 118.658,06 |
| Juiz de Fora 4 | 77.857 | 4,04 | 6,00 | 3,26 | 6,00 | R\$ 93.376,96 |
| Santos Dumont | 27.726 | 11,68 | 13,00 | 4,83 | 8,00 | R\$ 53.561,01 |
| UH Marmelos | 39.070 | 14,56 | 13,00 | 11,69 | 8,00 | R\$ 196.814,27 |

Fonte: Retirado de ANEEL (2020).

Tabela 3 – Índices de DEC e FEC e compensações pagas pela CEMIG em Juiz de Fora em 2019.

| Conjuntos Elétricos | Unidades Consumidoras | DEC | DEC Limite | FEC | FEC Limite | Compensações pagas |
|----------------------------|------------------------------|------------|-------------------|------------|-------------------|---------------------------|
| Juiz de Fora 1 | 92.972 | 12,85 | 11,00 | 7,54 | 7,00 | R\$ 465.155,06 |
| Juiz de Fora 2 | 111.905 | 4,81 | 5,00 | 4,16 | 6,00 | R\$ 156.043,16 |
| Juiz de Fora 4 | 62.932 | 5,07 | 6,00 | 4,10 | 6,00 | R\$ 111.894,51 |
| Juiz de Fora 8 | 18.776 | 8,91 | 6,00 | 7,27 | 6,00 | R\$ 66.584,94 |
| Santos Dumont | 23.049 | 12,00 | 13,00 | 3,66 | 8,00 | R\$ 90.473,42 |
| UH Joasal | 19.278 | 20,27 | 13,00 | 14,84 | 8,00 | R\$ 184.249,60 |
| UH Marmelos | 20.188 | 20,45 | 13,00 | 13,09 | 8,00 | R\$ 76.607,34 |

Fonte: Retirado de ANEEL (2020).

Pela análise dos dados observa-se a evolução dos índices de DEC e FEC da CEMIG com relação ao atendimento da cidade de Juiz de Fora. Na primeira coluna das tabelas, observa-se vários conjuntos elétricos que são agrupamentos de unidades consumidoras as quais pertencem a uma mesma área de concessão. Na segunda coluna das tabelas, observa-se o número total de unidades consumidoras de cada conjunto. Os índices de DEC e FEC apurados estão disponibilizados na terceira e na quinta coluna das tabelas. Estes índices geram multas para a

concessionária, pagas por meio de compensações nas contas dos usuários. Além disso, na quarta e na sexta coluna de cada tabela estão disponibilizados os limites anuais de DEC e FEC regulamentados para cada conjunto elétrico. Na última coluna das tabelas, observa-se os valores totais das compensações geradas.

Observa-se que a CEMIG gastou cerca de R\$2.620.000,00 com compensações devido à interrupção de fornecimento de energia na cidade de Juiz de Fora nos último três anos. A CEMIG atende também cerca de 770 outros municípios no estado de Minas Gerais, totalizando um gasto ainda maior com as compensações. É importante salientar, que além dos gastos relacionados as compensações, existe a perda de faturamento devido a energia não suprida. Sendo assim, é de fundamental importância que as interrupções sejam detectadas e localizadas o mais rápido possível para que os índices de qualidade sejam menos afetados.

1.2 MOTIVAÇÃO

Os sistemas de distribuição são bem complexos, na medida em que podem variar quanto à tamanho, tecnologias empregadas, presença de geração distribuída (GD), etc. Dessa maneira, há muitas possibilidades de pesquisas relacionadas dentro desse mesmo campo, tornando-o promissor e relevante para os tempos atuais.

Conforme já mencionado, as concessionárias de distribuição de energia no Brasil estão sujeitas à regulação por parte da ANEEL, para fornecimento de energia com qualidade e continuidade. Sendo assim, é importante que as concessionárias invistam em recursos que aumentem a confiabilidade da energia entregue. Sabe-se que os defeitos são inerentes à operação do sistema e, quando ocorrem, precisam ser detectados e localizados de maneira mais rápida possível para que os indicadores sejam menos afetados. É nessa perspectiva que as técnicas de análise de faltas para o sistema de distribuição possuem maior relevância, motivando pesquisas de técnicas que possam contribuir positivamente em melhores e mais rápidas detecções e localizações das faltas.

Nos últimos anos, tem-se observado melhorias nas tecnologias empregadas nos sistemas elétricos, favorecendo um novo cenário da distribuição de energia elétrica, mais integrada e com maior fluxo de informações entre concessionárias e consumidores. Esse contexto é conhecido como *Smart Grids* ou, no português, redes inteligentes de energia. O próprio crescimento das

gerações distribuídas tem sido um grande impulsionador desse novo cenário, pois exige uma integração mais efetiva entre os diversos consumidores, novos geradores e a distribuidora para planejamento da operação dos sistemas de distribuição (CEMIG, 2019).

Entre as principais inovações que estão aos poucos sendo aplicadas nas redes inteligentes, com perspectiva de crescimento de utilização para um futuro próximo, estão os chamados medidores inteligentes (ou *smart meters*, em inglês). Estes permitem a interação dos consumidores com a concessionária de energia, permitindo que acompanhem, continuamente, como a energia é utilizada pelos consumidores. As informações oriundas desses medidores podem mudar a operação dos sistemas de distribuição, abrindo portas para pesquisas em diversas áreas que possam usar esses dados.

Ainda no âmbito de temas tratados nesta dissertação destaca-se a utilização das redes neurais artificiais, empregadas com sucesso em várias áreas, inclusive na engenharia elétrica. Algumas características dessa técnica são extremamente interessantes na tarefa de detecção de faltas, que é uma questão muito importante para *Smart Grids*, podendo contribuir significativamente no sucesso dos resultados. Como exemplo das principais características das redes neurais que podem contribuir para a detecção de defeitos, cita-se: a capacidade de aprendizagem mediante um processo de treinamento, ou seja, pode adaptar-se rapidamente a mudanças ocorridas nos sistemas de energia; a capacidade de aplicação em tempo real, após o rápido processo de treinamento, com baixíssimo tempo de operação; a auto-organização de algumas redes, que ajustam os pesos e conexões; a tolerância a falhas, que permitem às redes, em alguns casos, operarem de maneira satisfatória, mesmo quando seus ajustes não estiverem exatamente empregados.

Devido às características citadas e outras ainda, as redes neurais vem sendo empregadas em variados ramos da indústria mundial, principalmente nos ramos voltados à tecnologia, como por exemplo, em sites de buscas, reconhecimento de voz e previsões de eventos futuros. Sendo assim, não há como negar que a técnica das redes neurais artificiais é bastante promissora e auxilia em uma tendência de que diversos meios operem de maneira automatizada e eficiente, como os próprios sistemas de distribuição.

Assim, devido aos elementos citados nesta seção, a importância da rápida e eficiente detecção de defeitos com a possibilidade de se obter cada vez mais medições nos sistemas de

distribuição e a boa tendência de aplicação de redes neurais artificiais, fica-se motivado a realizar trabalhos nessa área considerando os sistemas desequilibrados.

1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica deste trabalho foi concentrada principalmente na análise de trabalhos que utilizam técnicas para detecção de faltas.

O principal trabalho utilizado como base para esta dissertação é Ledesma (2016), no qual foi proposta uma metodologia para detecção e localização de faltas em áreas de observações de sistemas de distribuição. Para tanto, utilizou-se um programa baseado no método de injeção de correntes em coordenadas retangulares para simulação da rede e representação de alguns tipos de defeitos, como: faltas em derivação, abertura de circuito e defeitos simultâneos. Para a detecção e localização dos defeitos na rede foram utilizadas as redes neurais artificiais. Para o funcionamento das RNAs foram fornecidos os módulos e os ângulos de correntes e/ou tensões, supondo-se, que medições fasoriais foram realizadas. Observou-se bons resultados nas simulações com os sistemas do IEEE, demonstrando que a medição fasorial associada a utilização das RNAs pode gerar um método preciso e robusto para detecção e localização de faltas.

O trabalho de Oliveira *et al.* (2016) é utilizado para a detecção e classificação das FAIs, defeitos de abertura e defeitos simultâneos com auxílio das redes neurais artificiais. Para tanto, os autores propõem a utilização de um novo fator que depende do ângulo das correntes de defeito associado a outro fator já existente, que depende das correntes de sequência do sistema, em condições pré-falta e pós-falta. Com os dois fatores propostos e utilização de RNAs é possível detectar as faltas, bem como classificá-las de acordo com os tipos de defeitos citados. Este método foi validado com os sistemas IEEE 13 barras e IEEE 34 barras.

Assim como em Ledesma (2016) e em Oliveira *et al.* (2016), este presente trabalho visa tratar as faltas em derivação, as faltas séries e as faltas simultâneas, considerando apenas faltas monofásicas, com a utilização de redes neurais artificiais. No entanto, o método proposto neste trabalho utiliza apenas medições de correntes anteriores ao ponto de defeito ou medição das tensões em barras terminais para detecção de faltas que envolvam a quebra de condutores. Além

disso, outro diferencial está na realização de simulações em tempo real a qual verifica a viabilidade da técnica em sistemas de distribuição reais.

A revisão bibliográfica foi dividida em trabalhos relacionados à faltas de alta impedância, que é uma subdivisão das faltas em derivação e aos defeitos de abertura. Ambos os defeitos constituem a base para este trabalho.

1.3.1 Faltas em derivação

O trabalho de Ghaderia *et al.* (2017) faz uma revisão sobre as FAIs. A detecção das FAIs normalmente envolvem processos que são sequenciais e que abrangem a grande maioria dos métodos propostos na literatura. O primeiro processo consiste na medição de sinais de corrente, de tensão ou de ambos, no sistema em que se deseja detectar as faltas. O segundo processo consiste na extração de características dos sinais aferidos, seja no domínio do tempo ou da frequência. Os principais métodos de extração utilizados são: magnitudes em coordenadas de fase ou de sequência, valor RMS, transformada de *Fourier* (para extração de componentes harmônicas), Transformadas *Wavelet* (TW), etc. O terceiro processo consiste na utilização de um classificador para diferenciação das FAIs de outros possíveis eventos no sistema. Entre os principais classificadores encontram-se os limitadores de grandezas, as redes neurais, as máquinas de vetores suporte, as árvores de decisões, entre outros. Segundo os autores, cerca de 23% das técnicas utilizadas para detecção de faltas são baseadas em redes neurais artificiais. Dessa maneira, aponta-se que as técnicas voltadas para a inteligência artificial realmente são promissoras e vêm sendo bastante empregadas nas pesquisas.

O trabalho de Gururajapathy *et al.* (2017) faz uma revisão de métodos para detecção e localização de defeitos em sistemas de distribuição com geração distribuída. Para a detecção de defeitos, além dos métodos classificadores que, em sua maioria, envolvem inteligência artificial, existem outros métodos matemáticos que também podem ser empregados. Pode-se citar, como exemplo, os métodos baseados em cálculo da impedância do sistema em condições pré-falta e pós-falta (semelhante aos relés de distância) e os métodos baseados em ondas viajantes, que se baseiam na transmissão e reflexão de ondas em linhas aéreas. Também podem ser empregados outros métodos, como os que se baseiam em medições de grandezas fasoriais em vários pontos, permitindo o cálculo de equivalentes de Thevenin para localização dos defeitos.

Para ilustrar a variabilidade de trabalhos que lidam com os defeitos de contato, mais particularmente com as faltas de alta impedância, realiza-se uma breve descrição de alguns dos trabalhos que foram revisados.

Em Fanucchi (2014) utilizou-se transformadas *Wavelet* (TW) e redes neurais artificiais (RNAs) para detecção e localização de faltas em sistemas de distribuição. A simulação baseou-se na reprodução de um sistema real com a presença de transformadores, capacitores, motores de indução, forno a arco, etc. A aquisição de dados foi totalmente modelada no simulador, com utilização de transformadores de corrente (TCs) e transformadores de potencial (TPs), filtros, sistemas de amostragem e conversores A/D. Para o funcionamento do método foram utilizados três módulos distintos. O primeiro foi responsável por detectar discontinuidades nos sinais, sejam elas naturais de qualquer evento, como: chaveamento de capacitores ou transformadores, ou as próprias FAIs, utilizando as TW. O segundo módulo foi responsável por diferenciar as FAIs de outros eventos a partir a utilização das RNAs e com auxílio de outras informações adicionais, como as distorções totais e individuais (DTI) pares e ímpares e a corrente de sequência zero. Caso o segundo módulo identificasse o evento como uma FAI, ativava-se o terceiro módulo. No último módulo, as tensões e as correntes aferidas foram utilizadas para estimação da localização da falta com auxílio de outras RNAs.

O trabalho de García *et al.* (2014) apresenta um método de detecção de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição utilizando RNAs. Inicialmente, realizou-se uma revisão a respeito das características das FAIs. Com isso, elas foram representadas através de dois resistores em paralelo cujos valores foram calculados com algumas equações. A detecção das faltas foi realizada através de um bloco que analisa as componentes harmônicas das correntes aferidas, assim como a TDH e as componentes de sequência zero, positiva e negativa. Em uma primeira etapa, dentro do bloco de detecção de defeitos, foram analisadas as componentes harmônicas de ordem pares e, posteriormente, as componentes ímpares. Depois, uma rede neural foi utilizada para separar as FAIs de outros possíveis eventos.

Em Vianna *et al.* (2016) propõe-se a detecção das FAIs internamente à determinadas áreas definidas na média tensão dos sistemas de distribuição. Cada área é composta por dois medidores nas bordas, os quais realizam a medição da corrente de sequência zero. A componente diferencial originada pelos módulos das correntes de sequência zero aferidas é responsável por indicar os defeitos. Essa técnica foi denominada de proteção quasi-diferencial de sequência zero

(PQDSZ) e funciona com medições do tipo não-fasorial. Destaca-se que a técnica proposta foi simulada em tempo-real com resultados significativos.

O trabalho de Acácio (2017) tem uma abordagem um pouco diferente. Nele realizou-se a alocação de medidores em sistemas de distribuição para detecção e localização da região onde faltas monofásicas foram aplicadas, com o auxílio de técnicas de inteligência artificial. O método proposto consistiu na utilização de algoritmos genéticos (AG) para a alocação dos medidores de forma a auxiliar na detecção e a localização dos defeitos. Além disso, RNAs foram utilizadas como rotina interna do AG para calcular os desempenhos de uma determinada população. As entradas das redes neurais consistiram nas correntes dos medidores alocados, não-fasoriais ou fasoriais em coordenadas de fase ou de sequência, dependendo dos cenários analisados. Com a definição da localização dos medidores, definia-se também áreas entre medidores, as quais os defeitos eram internamente localizados.

Em Farias *et al.* (2018) fez-se uma revisão sobre as FAIs, onde constatou-se que o modelo definido por duas resistências variáveis em série era mais eficiente para representação das principais características das FAIs. A tensão no ponto de defeito foi calculada através de uma equação de quarto grau. O método utilizou as tensões e correntes aferidas na subestação de energia, além de parâmetros estimados da rede para cálculo da distância da falta em relação ao início do alimentador. Dessa forma, a estimação de parâmetros da rede foi realizada por uma RNA continuamente treinada em modo on-line. Com a estimação dos parâmetros do sistema em condições de defeitos tornou-se possível o cálculo da distância das FAIs, localizando-as.

Em Sarwar *et al.* (2019) utilizou-se as Máquinas de Vetores Suporte (SVM) para a detecção das FAIs em sistemas de distribuição. Inicialmente, um modelo para as FAIs foi proposto. Neste modelo, duas fontes de tensão contínuas associadas a dois diodos em antiparalelo e resistências variáveis em série aos diodos modelavam a falta e suas características. As tensões aferidas em todas as barras do sistema IEEE 13 barras foram utilizadas como entradas de SVMs binárias para detecção dos defeitos e SVMs multiclases para classificação dos defeitos.

1.3.2 Defeitos de abertura e simultâneos

Os defeitos de abertura de condutores e os defeitos simultâneos são bem menos difundidos na literatura do que as faltas de alta impedância. Além disso, em muitos trabalhos, os defeitos de abertura e os defeitos simultâneos não são muito bem diferenciados, sendo tratados apenas como defeitos que envolvem a quebra (ou abertura) de condutores. Por esse motivo, a revisão desses tipos de defeito foi realizada em conjunto. Uma breve introdução sobre alguns dos trabalhos revisados foi descrita a seguir.

O trabalho Garcia-Santander *et al.* (2005) propõe um método de detecção de faltas de aberturas com contato ao solo baseado em desequilíbrios de tensões. Considera-se que haja medidores de tensão em todas as barras terminais do sistema de distribuição, como premissa. O método proposto classifica os sensores como ativos quando a diferença de tensão pré-falta e pós-falta, ambas de sequência positiva, são superiores a determinado valor limiar. Posteriormente, é proposto um algoritmo que lista todos os caminhos possíveis dos sensores ativos até a subestação e depois, analisa-se qual caminho é comum dentre todos. Assim, fica evidente o local onde a falta está localizada. Foram simulados defeitos simultâneos variando-se a impedância e o lado de contato com o solo. Notou-se que a impedância de falta é pouco relevante no método e quando a falta ocorre do lado mais próximo à subestação, a variação da tensão é maior.

O trabalho de Wilson e Vadlamani (2015) analisou as faltas de abertura em sistemas de distribuição através dos circuitos de sequências. Para defeitos de abertura monofásicos observa-se que a proteção ANSI 46, baseada no cálculo das correntes de sequência negativa e a proteção ANSI 50/51, associada à corrente residual, isto é, na corrente de sequência zero, não são muito eficazes quando o sistema varia entre períodos de carga leve e pesada. Dessa maneira, a proteção ANSI 46PD, que realiza a divisão entre as correntes de sequência negativa e positiva é bem mais eficaz devido a maior adaptação quanto ao funcionamento em carga leve ou pesada. Além disso, foi proposto um sistema de proteções ANSI 46PD em cascata no ramal principal dos SDs de acordo com o carregamento dos ramais laterais. Dessa forma, a perda de carga referente a defeitos localizados no ramal principal, pode ser mais sentida. Realizou-se também, a análise do método proposto quando ocorre a abertura de dois circuitos e, as mesmas conclusões

anteriores foram obtidas. A abertura de duas fases foi ainda mais detectável devido ao maior desequilíbrio entre as correntes.

O trabalho de Jayamaha *et al.* (2017) baseou-se na divisão entre a corrente de sequência negativa pela corrente de sequência positiva na saída da subestação de energia para detecção de faltas de abertura em sistemas de distribuição. As faltas foram modeladas como aberturas em determinada fase com a presença de altas impedâncias do lado mais próximo a subestação (defeito simultâneo com contato pelo lado mais próximo à subestação). A principal preocupação observada no método proposto foi a diferenciação entre os desbalanços de corrente naturais do sistema de distribuição dos desbalanços causados por eventuais defeitos. Dessa forma, estipulou-se que o máximo desequilíbrio que ocorre em sistemas de distribuição não é superior a 40% entre o maior e o menor valor de corrente nas três fases. Dessa forma, simulações foram realizadas em períodos de carga leve e pesada mostrando que esse desequilíbrio não ultrapassava um limiar de 0,15, na divisão entre as correntes de sequência negativa e positiva. Dessa forma, valores superiores ao limiar indicavam a ocorrência de defeito e, valores inferiores indicavam condições normais de operação. A principal dificuldade apontada no método proposto foi a detecção de defeitos em ramais laterais ou no final do ramal principal onde o desequilíbrio normalmente não provoca desbalanços de correntes suficientes para detecção dos defeitos. A solução proposta para esse problema foi a instalação de outros equipamentos baseados no mesmo tipo de análise, em pontos mais próximos ao fim do ramal principal ou dos ramais laterais, para uma maior sensibilidade às variações nas correntes.

Em Lau e Ho (2017) foram analisadas faltas de abertura em sistemas de distribuição com linhas aéreas rurais de Hong Kong, caracterizados pela operação em anel aberto, diferentemente dos modernos sistemas urbanos subterrâneos que operam malhados. Alguns estudos realizados em diversos cenários possíveis para as faltas de abertura de condutores concluíram que as medições de tensões após o ponto de defeito foram mais eficazes no processo de detecção. Mais precisamente, tensões de fase abaixo dos valores nominais e tensões de sequência zero mais elevadas podem ser indícios de faltas de abertura monofásicas e bifásicas. Também, foram realizados estudos para detecção desse tipo de falta em transformadores de distribuição. O método proposto foi implementado e testado em sistemas reais e os resultados comprovaram a eficiência do esquema proposto.

Em Wang *et al.* (2019), as faltas de abertura são apresentadas como um problema para a manutenção da operação de sistemas industriais (SIs) quando na presença de transformadores do tipo estrela aterrada no lado primário e sem carga no lado secundário. Com isso, foi proposto um esquema que utiliza o desbalanço de tensão no trafo devido a condição de circuito aberto do defeito como sinais de teste. A condição de defeito foi verificada a partir da análise da corrente aferida no neutro do transformador.

1.3.3 Considerações sobre a revisão bibliográfica

Além dos trabalhos descritos nos subcapítulos anteriores, outros também foram revisados para a elaboração deste trabalho. A Tabela 4 ilustra os trabalhos revisados organizados por ano de publicação, tipo de defeito (faltas de alta impedância – FAI e defeitos com quebra de condutores – DQC), tipo de sistema analisado (sistema de distribuição – SD, sistema de transmissão – ST e sistema industrial em um dos trabalhos), tipo de medição realizada e técnica empregada para a detecção dos defeitos.

Tabela 4 – Resumo dos trabalhos revisados.

| Trabalho | Ano | Tipo de defeito | | Tipo de sistema | | Medição | Técnicas empregadas |
|--------------------------------|------|-----------------|-----|-----------------|----|---------------------|--|
| | | FAI | DQC | SD | ST | | |
| Garcia-Santander <i>et al.</i> | 2005 | | ✓ | ✓ | | Tensões | Sensores de tensão em barras terminais |
| Michalik <i>et al.</i> | 2008 | ✓ | | ✓ | | Tensões e correntes | Corrente de sequência zero e RNA |
| Gilany <i>et al.</i> | 2010 | | ✓ | | ✓ | Tensões e correntes | RNA |
| Zayandehroodi <i>et al.</i> | 2011 | ✓ | | ✓ | | Correntes | Valores limiares e RNA |

| | | | | | | |
|------------------------------|------|---|---|---|--------------------------------------|---|
| Javadian e Massaeli | 2011 | ✓ | | ✓ | Correntes | Valores limiares e RNA |
| Dehghani e Nezami | 2013 | ✓ | | ✓ | Tensões, correntes e potências | Valores limiares, componentes simétricas e RNA |
| Fanucchi | 2014 | ✓ | | ✓ | Tensões e correntes | TW, TDH, RNA |
| Nareshkumar | 2014 | | ✓ | | Tensões e correntes | RNA |
| García <i>et al.</i> | 2014 | ✓ | | ✓ | Correntes | TDH, Componentes simétricas, RNA |
| Shi e Cong | 2014 | | ✓ | ✓ | Correntes | Componentes simétricas |
| Ren <i>et al.</i> | 2014 | ✓ | | ✓ | Tensões e correntes | Método diferencial usando fasores sincronizados |
| Wilson e Vadlamani | 2015 | | ✓ | ✓ | Correntes | Componentes simétricas |
| Vianna <i>et al.</i> | 2016 | ✓ | | ✓ | Correntes | Proteção quasi- diferencial de sequência zero |
| Abdel-Aziz <i>et al.</i> | 2016 | | ✓ | | Correntes | RNA |
| Acácio | 2017 | ✓ | | ✓ | Correntes | AG, RNA |
| Jayamaha <i>et al.</i> | 2017 | | ✓ | ✓ | Correntes | Componentes simétricas |

| | | | | | | |
|------------------------|------|---|---|---------------------|--|--|
| Sarwagya <i>et al.</i> | 2017 | ✓ | ✓ | Tensões e correntes | Tensão residual e corrente de sequência negativa | |
| Torres <i>et al.</i> | 2017 | ✓ | ✓ | Correntes | TW | |
| Lau e Ho | 2017 | | ✓ | Tensões | Sensores de tensão posteriores aos defeitos | |
| Santos <i>et al.</i> | 2017 | ✓ | ✓ | Tensões | TW | |
| Lucas <i>et al.</i> | 2018 | ✓ | ✓ | Tensões e correntes | TW e RNA | |
| Chaitanya e Yadav | 2018 | ✓ | ✓ | Correntes | Lógica Fuzzy | |
| Liu <i>et al.</i> | 2018 | | ✓ | ✓ | Correntes | Análise de correntes de sequência zero |
| Farias <i>et al.</i> | 2018 | ✓ | ✓ | Tensões e correntes | RNA | |
| Sarwar <i>et al.</i> | 2019 | ✓ | ✓ | Tensões | SVM | |
| Wang <i>et al.</i> | 2019 | | ✓ | Sistema industrial | Tensões | Desequilíbrios de tensão |
| Chakraborty e Das | 2019 | ✓ | ✓ | Tensões | Componentes harmônicas de tensão | |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar que existem na literatura muitos métodos diferentes para a detecção dos tipos de defeitos propostos neste trabalho. Porém, considera-se a utilização das redes neurais como uma ferramenta promissora no futuro dos sistemas de distribuição. Então, a técnica proposta neste trabalho se baseia na utilização de redes neurais para a detecção de qualquer um dos

tipos de defeitos tratados. Para a detecção de defeitos com medições de correntes utiliza-se medidores localizados na subestação de energia ou também em outros pontos do sistema. Além disso, podem ser utilizados diferentes tipos de entradas de corrente nas redes neurais. Portanto, conclui-se que o método proposto se adapta bem ao sistema e às condições técnicas do mesmo, com eficiência nos resultados, conforme será demonstrado.

Os métodos anteriormente detalhados usaram variadas técnicas para a detecção dos tipos de defeitos em sistemas de distribuição. No entanto, como pode ser visto, cada um deles apresentou um método específico para a detecção de determinado tipo de defeito. Dessa forma, conclui-se que poucos trabalhos trazem uma mesma abordagem para detecção de qualquer tipo de defeito, o que considera ser uma vantagem deste trabalho: RNAs podem ser empregadas para a detecção de qualquer tipo de defeito, mudando-se apenas sua arquitetura e/ou os dados recebidos como entrada nas redes.

Além disso, conforme foi apresentado, poucos trabalhos realizam a simulação das técnicas empregadas em escala de tempo real, como será mostrado neste trabalho. Assim, considera-se que a proposta da utilização de RNAs para a detecção de defeitos, conforme proposto neste trabalho, está um passo a frente para ser utilizada em campo, nos sistemas de distribuição reais.

1.4 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo analisar características de diferentes tipos de defeitos monofásicos e desenvolver redes neurais para identificação e detecção mais precisa de cada tipo de defeito. Os defeitos monofásicos, segundo pesquisas, constituem mais de 80% dos defeitos em linhas aéreas. Neste trabalho são realizadas simulações computacionais e simulações em tempo real para verificação da robustez da técnica de redes neurais.

Nos estudos e nas simulações computacionais espera-se verificar características importantes associadas a cada tipo de defeito e utilizar estas informações no desenvolvimento das ferramentas que possam melhorar a detecção das faltas. Então, as simulações computacionais foram divididas em duas partes. A primeira parte, que utiliza medições de corrente para detecção e identificação de defeitos, apresenta também algumas análises quanto a variação no número de medidores alocados nos sistemas e quanto ao tipo de entrada fornecido

para as redes neurais. Resultados eficientes são objetivos desta parte. A segunda parte, que utiliza medições de tensão em barras terminais para detecção de defeitos de abertura e simultâneos, tem como objetivo trazer uma alternativa eficiente para detecção dos defeitos citados.

E por fim, objetiva-se com a realização de simulações em tempo real, validar a robustez e a aplicabilidade do método proposto desenvolvido para detecção dos tipos de defeito em sistemas de distribuição.

1.5 PUBLICAÇÕES DECORRENTES

Este trabalho resultou nas seguintes publicações:

- 1) “Avaliação da estrutura de saída de redes neurais artificiais utilizadas na detecção de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição”. Artigo apresentado na 13th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON), São Paulo, SP, Novembro de 2018.
- 2) “Detection of open-circuit faults in areas among meters in distribution systems using artificial neural networks”. Artigo apresentado na conferência Innovative Smart Grid Technologies (ISGT) Latin America 2019. Gramado, RS, Setembro de 2019.
- 3) "Evaluation of the Output Structures from Artificial Neural Networks on the Performance of Fault Detection in Power Distribution Systems". Artigo apresentado na conferência Innovative Smart Grid Technologies (ISGT) Latin America 2019. Gramado, RS, Setembro de 2019.
- 4) "Detecção de Faltas de Abertura em Sistemas de Distribuição". Artigo apresentado no Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente - SBAI. Ouro Preto, MG, Outubro de 2019.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado em oito capítulos e os apêndices.

Neste primeiro capítulo apresentam-se as considerações iniciais, motivações e objetivos desta dissertação. Além disso, é apresentada uma revisão bibliográfica quanto aos tipos de defeitos que são tratados neste trabalho.

No segundo capítulo introduz-se um sistema teste no qual podem ser observadas as principais características relacionadas a cada um dos defeitos tratados nesta dissertação para que se busque a melhor maneira de detectá-los nas simulações.

No terceiro capítulo introduz-se os processos para a realização das simulações computacionais utilizadas com o intuito de validação dos métodos propostos para detecção e identificação dos tipos de defeitos. Neste capítulo, apenas as simulações envolvendo medições de corrente como entrada das redes neurais foram explanadas.

No quarto capítulo, os resultados das simulações computacionais envolvendo medições de corrente como entrada para as redes neurais são apresentados e analisados.

No quinto capítulo, introduz-se a técnica para detecção dos defeitos de abertura e dos defeitos simultâneos envolvendo medições de tensão em barras terminais como entrada para as redes neurais artificiais. Também, foram apresentados os resultados obtidos com a aplicação da técnica proposta.

No sexto capítulo apresenta-se a construção e a realização das simulações em tempo real utilizando-se o RTDS e o dSPACE. Testes são realizados para validação e verificação da robustez do método proposto. Além disso, apresenta-se uma análise quanto ao tempo de atuação das redes neurais.

No sétimo capítulo traz-se as conclusões a respeito dos métodos e das simulações realizadas, além de propostas para trabalhos futuros.

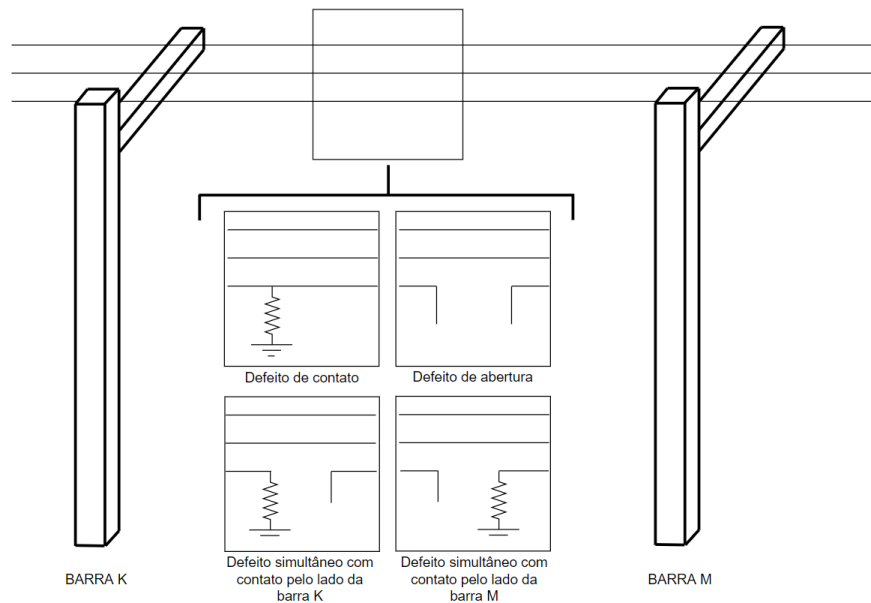
2 EMBASAMENTOS E PREMISSAS PARA A DETECÇÃO DE DEFEITOS

Este capítulo tem como objetivo introduzir alguns conceitos e premissas essenciais para a compreensão deste trabalho.

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os sistemas de distribuição são responsáveis por entregar energia elétrica para os consumidores finais. Por isso, estes sistemas estão, muitas vezes, mais próximos dos centros populacionais, enfrentando os mais diversos desafios para se manterem continuamente operando e de forma confiável. É comum que ocorram os mais diversos tipos de problemas que, em muitos casos, acabam se transformando em defeitos na rede elétrica. Este trabalho tem como foco principal a detecção de alguns tipos de defeitos que podem ocorrer nos sistemas de distribuição, tais como: contato de uma fase com o solo, abertura de um condutor e os defeitos simultâneos (abertura de condutor com contato ao solo de algum dos lados). O Esquema 1 mostra, de maneira simplificada, cada um dos defeitos citados.

Esquema 1 – Representação dos tipos de defeitos.

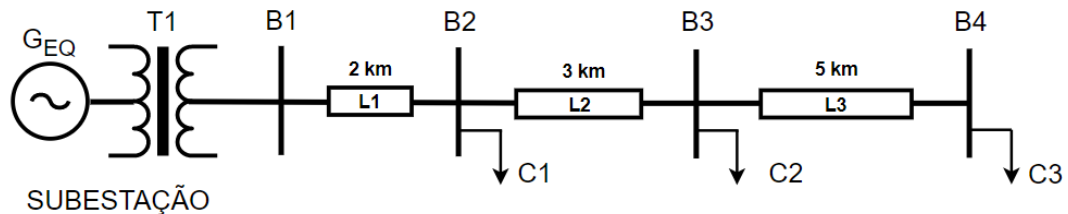


Fonte: Elaborado pelo autor.

Cada um desses defeitos possuem características próprias que os diferem entre si. Dessa maneira, neste capítulo, apresenta-se estudos realizados buscando a melhor forma de detectar cada um deles.

Sendo assim, introduz-se primeiramente, um sistema de distribuição simples com apenas 4 barras (todas em média tensão) com características bem próximas aos sistemas de distribuição do IEEE, ou seja, cargas conectadas diretamente na média tensão, mostrado na Figura 1. Este sistema servirá de base para análises de defeitos neste capítulo.

Figura 1 – Sistema teste de 4 barras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As características do gerador que representa o sistema de transmissão estão dispostas na Tabela 5, onde supõe-se nível de subtransmissão em 69 kV, alimentando um transformador abaixador (69 kV – 13,8 kV) em uma subestação de energia.

Tabela 5 – Dados referentes ao gerador equivalente do sistema base.

| Potência de curto-circuito trifásico | Nível de tensão | Tensão na subestação |
|---|------------------------|-----------------------------|
| 200 MVA | 69 kV | 1,05 pu |

Fonte: Elaborado pelo autor.

O sistema é composto por um transformador abaixador de 69 kV para 13,8 kV, cujas principais características encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 – Dados referentes ao transformador abaixador da subestação do sistema base.

| Trafo | Conexão | Relação de transformação | R série (cada lado) | Potência nominal (emergência) | Reatância de dispersão |
|--------------|----------------|---------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| T1 | Δ - Yat | 69 kV – 13,8 kV | 0,0005% | 5000 kVA (7500 kVA) | 0,01% |

Fonte: Elaborado pelo autor.

No sistema proposto considera-se duas cargas trifásicas desequilibradas nas barras B2 e B4 e uma carga trifásica equilibrada na barra B3. As cargas apresentam níveis de carregamento diferentes, sendo que as cargas mais próximas à subestação são maiores do que as cargas mais próximas ao fim do ramal. Com isso, as correntes observadas na subestação serão maiores do que as correntes no fim do ramal. Então, algumas observações importantes ficarão mais evidentes nas simulações envolvendo o sistema teste proposto.

As cargas trifásicas desequilibradas estão definidas na Tabela 7. A carga equilibrada está definida na Tabela 8.

Tabela 7 – Dados referentes às cargas trifásicas desequilibradas do sistema teste.

| Carga | Modelo | Tensão nominal (kV) | Potência ativa nominal (kW) | | | Potência reativa nominal (kvar) | | |
|--------------|--------------------|----------------------------|------------------------------------|---------------|---------------|--|---------------|---------------|
| | | | Fase a | Fase b | Fase c | Fase a | Fase b | Fase c |
| C1 | Potência constante | 7,967 | 680 | 695 | 710 | 250 | 255 | 255 |
| C3 | Potência constante | 7,967 | 19 | 15 | 17 | 8 | 5 | 10,5 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8 – Dados referentes à carga trifásica equilibrada do sistema teste.

| Carga | Modelo | Tensão nominal (kV) | Potência ativa por fase (kW) | Potencia reativa por fase (kvar) |
|--------------|--------------------|----------------------------|-------------------------------------|---|
| C2 | Potência constante | 13,8 | 200 | 70 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, a conexão entre os equipamentos são realizadas através de linhas de distribuição desequilibradas.

Simulou-se o fluxo de potência nesse sistema com o auxílio do software OpenDSS e obteve-se a convergência após 5 iterações.

As correntes medidas na saída do transformador de potência (medição na subestação de energia) estão transcritas na Tabela 9. As tensões nos barramentos estão transcritas na Tabela 10.

Tabela 9 – Correntes aferidas na subestação do sistema teste em operação normal.

| | Fase a | Fase b | Fase c | Neutro |
|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Módulos (A) | 98,73 | 100,02 | 102,26 | 3,02 |
| Ângulos (°) | 159,3 | 39,4 | -80,6 | 124,2 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 – Tensões aferidas nos barramentos do sistema teste em operação normal.

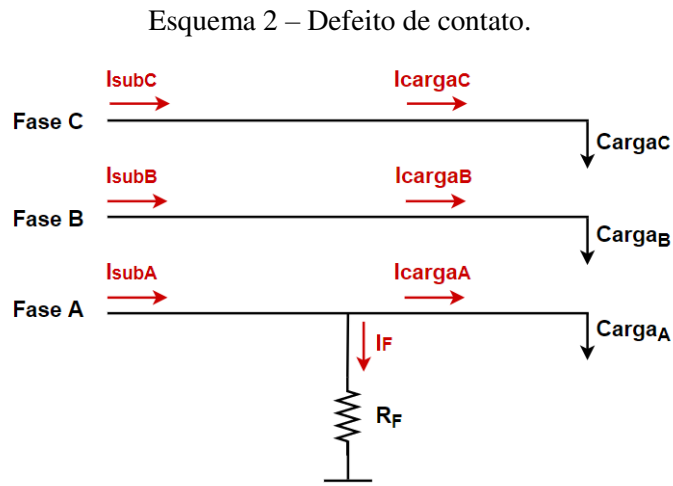
| Barra | Fase A | | Fase B | | Fase C | |
|--------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| | Módulo (pu) | Ângulo (°) | Módulo (pu) | Ângulo (°) | Módulo (pu) | Ângulo (°) |
| B1 | 1,0432 | -0,5 | 1,0433 | -120,5 | 1,0431 | 119,5 |
| B2 | 1,0367 | -0,6 | 1,0374 | -120,7 | 1,0364 | 119,3 |
| B3 | 1,0356 | -0,6 | 1,0365 | -120,7 | 1,0353 | 119,3 |
| B4 | 1,0352 | -0,6 | 1,0363 | -120,7 | 1,0348 | 119,3 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados de correntes e de tensões apresentados compõem o ponto de operação normal deste sistema base. Nas próximas seções serão realizadas simulações referentes aos diferentes tipos de defeitos para que suas principais características sejam aferidas e utilizadas no processo de detecção de defeitos.

2.2 CARACTERÍSTICAS DOS DEFEITOS DE CONTATO

Este tipo de defeito é caracterizado pelo contato de determinada fase do sistema com uma superfície ou objeto, definindo um caminho para o solo. Com o objetivo de elucidar melhor suas características, um defeito de contato foi representado de acordo com o Esquema 2. Para a exemplificação, o defeito foi aplicado na fase A, enquanto as demais fases operavam sob condições normais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As cargas das três fases do sistema foram equivalentadas em um único ponto e as correntes necessárias para alimentar essas cargas foram definidas por: I_{cargaA} , I_{cargaB} e I_{cargaC} . O defeito, conforme citado, também absorve certo valor de corrente, definido por I_F . Dessa forma, na fase sob defeito, observa-se que a corrente medida na saída da subestação de energia, definida por I_{subA} é a associação da corrente de carga e a corrente de defeito, de acordo com a Equação (1).

$$I_{\text{subA}} = I_{\text{cargaA}} + I_{\text{F}} \quad (1)$$

Então, observa-se que a corrente medida na subestação de energia tende a aumentar com a ocorrência de um defeito de contato. O nível de tensão do sistema assim como a impedância do objeto ou da superfície de contato são essenciais para a determinação da corrente de falta (I_{F}). Normalmente, os defeitos de contato são divididos em dois grupos com características distintas: os defeitos com baixa impedância e os defeitos com alta impedância.

Para analisar quantitativamente as características desse tipo de defeito com a variação da impedância de contato, foram aplicados no sistema teste, curtos-circuitos monofásicos na fase A da linha L1 (no meio da linha) com diferentes resistências. Os resultados estão disponibilizados na Tabela 11.

Tabela 11 – Variação das correntes de acordo com a impedância de defeito.

| Situação | I_A (A) | I₀ (A) | I₁ (A) | I₀/I₁ (%) |
|---------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--|
| Carregamento normal | 98,73 | 1,01 | 100,34 | 1,00 |
| Falta com R = 10 | 869,20 | 256,91 | 356,04 | 72,16 |
| Falta com R = 100 | 178,65 | 26,84 | 126,64 | 21,19 |
| Falta com R = 1000 | 106,58 | 2,32 | 102,95 | 2,25 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além disso, na Tabela 12, observou-se situações de aumento no carregamento do sistema, isto é, todas as cargas foram aumentadas em 10% e 20% de acordo com seus valores nominais. Para cada situação, aferiu-se a corrente na subestação de energia e a razão entre as correntes de sequência zero e positiva observada na subestação.

Tabela 12 – Variação das correntes de acordo com aumentos de carregamento.

| Situação | I _A (A) | I ₀ (A) | I ₁ (A) | I ₀ /I ₁ (%) |
|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------------------------|
| Carregamento normal | 98,73 | 1,01 | 100,34 | 1,00 |
| Carregamento (+10%) | 108,75 | 1,11 | 110,52 | 1,01 |
| Carregamento (+20%) | 118,80 | 1,22 | 120,73 | 1,01 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

As faltas de baixa impedância de contato apresentam alta magnitude na corrente que flui do sistema para o solo. Assim, os principais dispositivos de proteção dos sistemas de distribuição, como os relés de sobrecorrente (funções 50 e 51) e/ou fusíveis são capazes de detectá-las de maneira razoavelmente fácil e atuar, abrindo uma parte do sistema até que se elimine a falta.

As faltas com alta impedância de contato normalmente apresentam magnitudes de correntes de defeito muito inferiores do que as das faltas de baixa impedância. Em muitos casos, essas correntes de falta são relativamente pequenas se comparadas às variações diárias no carregamento dos sistemas de distribuição (variações entre os períodos de carga leve e pesada). Normalmente, os dispositivos de proteção convencionalmente usados não possuem sensibilidade suficiente para detectar estes defeitos. Além disso, devido a característica desequilibrada dos sistemas de distribuição, as funções de proteção de neutro (funções 50N e 51N) são impossibilitadas de detectar estes defeitos devido ao ajuste de *pick-up*, normalmente superior a 30%.

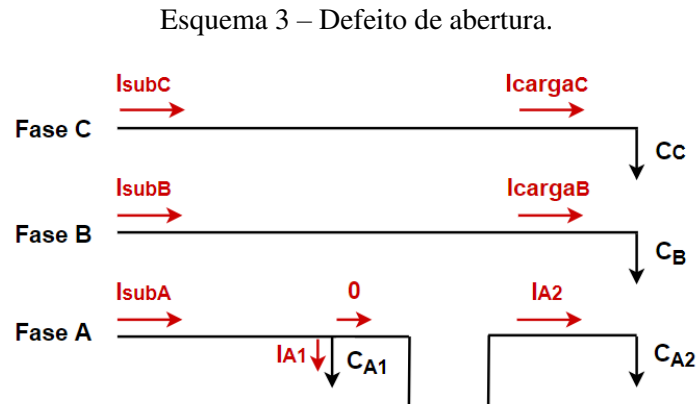
Portanto, pode-se dizer que os defeitos em derivação com alta impedância de contato são bem menos detectáveis pelos dispositivos de proteção dos sistemas de distribuição atuais do que os defeitos de baixa impedância. Portanto, neste trabalho, o foco é dado nas faltas de alta impedância que precisam de mais desenvolvimentos para suas corretas detecções.

Uma possível alternativa para melhorar a análise dos defeitos de contato se dá através da relação entre a corrente de sequência zero dividida pela corrente de sequência positiva. Isso ocorre porque a corrente de sequência zero indica presença de corrente circulando pra terra e o defeito de contato estabelece exatamente um caminho para a terra. Dessa forma, fica evidente, através dos dados aferidos, que a relação entre as correntes de sequência citadas aumenta de

acordo com o aumento da corrente de falta, e que por sua vez, aumenta com a diminuição da resistência de falta.

2.3 CARACTERÍSTICAS DOS DEFEITOS DE ABERTURA SEM CONTATO

Este tipo de defeito caracteriza-se pelo rompimento de algum cabo energizado do sistema de distribuição, sem que este cabo realize contato com o solo. Com o objetivo de elucidar melhor as características deste tipo de defeito, um defeito de abertura foi proposto no Esquema 3. Para a exemplificação, o defeito foi aplicado na fase A, enquanto as demais fases operavam sob condições normais.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As cargas das duas fases sãs do sistema foram equivalentadas em um único ponto e as correntes necessárias para alimentar essas cargas foram definidas por: I_{cargaB} e I_{cargaC} . Já na fase em que o defeito ocorreu, as cargas foram equivalentadas em dois pontos, antes e depois do defeito, definidas por I_{A1} e I_{A2} . A corrente total que seria absorvida da subestação para atendimento das cargas sem a ocorrência do defeito, é definida por I_{cargaA} . Então, poderia-se definir a Equação (2).

$$I_{cargaA} = I_{A1} + I_{A2} \quad (2)$$

Entretanto, o defeito de abertura faz com que as cargas localizadas posteriormente ao ponto de defeito não sejam atendidas. Dessa maneira, a corrente medida na subestação de

energia, definida por I_{subA} , é caracterizada por um decréscimo de corrente com relação à situação normal de operação do sistema, de acordo com a Equação (3).

$$I_{\text{subA}} = I_{\text{cargaA}} - I_{A2} \quad (3)$$

Então, observa-se que a corrente medida na subestação de energia tende a diminuir com a ocorrência de um defeito de abertura.

Para analisar quantitativamente as características dos defeitos de abertura, aplicou-se este tipo de defeito na fase B das linhas L1, L2 e L3 do sistema teste e observou-se a corrente na mesma fase B na subestação de energia. Também calculou-se a divisão entre os módulos das correntes de sequência negativa pela positiva na subestação. A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 13 – Dados obtidos na subestação para diferentes condições de defeitos de abertura no sistema teste.

| Situação | I_B (A) | I₂ (A) | I₁ (A) | I₂/I₁ (%) |
|-----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--|
| Normal | 100,02 | 1,06 | 100,34 | 1,06 |
| Defeito em L1 | 0 | 34,62 | 66,19 | 52,30 |
| Defeito em L2 | 89,45 | 5,22 | 95,62 | 5,46 |
| Defeito em L3 | 98,10 | 1,33 | 99,70 | 1,33 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando-se as correntes, pode-se concluir que a queda de corrente na fase em que o defeito ocorreu é proporcional às cargas que estão conectadas nesta mesma fase posteriores ao ponto de falta e, que por esse motivo, não foram alimentadas. Dessa forma, pode-se observar que para as medições da subestação, quanto mais perto o defeito, mais fácil de ser detectado.

Para defeitos próximos ao final dos ramais de distribuição, onde o montante de carga alocado normalmente é baixo, o decréscimo de corrente é muito menor e a dificuldade de detecção do defeito aumenta. Uma alternativa para a detecção de defeitos próximos aos finais de ramais, seria a alocação de medidores de corrente mais próximos a esses pontos. Conforme

mostrado na Tabela 14, as características da falta na linha L3 seriam detectadas mais facilmente por um medidor na linha L2.

Tabela 14 – Correntes aferidas na linha L2 para condições de defeito de abertura na linha L3 do sistema teste.

| Situação | I_B (A) | I₂ (A) | I₁ (A) | I₂/I₁ (%) |
|-----------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--|
| Normal | 10,46 | 0,11 | 10,79 | 1,01 |
| Defeito em L3 | 8,55 | 0,70 | 10,17 | 6,88 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma outra característica interessante com relação aos defeitos de abertura é quanto ao desequilíbrio de correntes. Pode-se observar que a razão entre as correntes de sequência negativa e as de sequência positiva dá bons indícios quanto ao nível de desequilíbrio do sistema. É notável que esse desequilíbrio cresce da situação normal de carregamento para as situações de defeito. Da mesma forma, pode-se dizer que quanto mais próximo o defeito ocorrer da subestação, maior será o desequilíbrio das correntes medidas na própria subestação, devido a diferença nos módulos das correntes. Na Tabela 14 nota-se que a diferença entre as correntes medidas na fase B da situação normal para a situação de defeito é pouco evidente. No entanto, quando se observa a relação entre as correntes de sequência proposta, fica mais evidente a diferença nos resultados.

Outra característica que pode-se observar com relação aos defeitos de abertura sem contato diz respeito à variação de tensão nas barras do sistema. A Tabela 15 mostra as tensões nas barras para os defeitos aplicados nas linhas, também na fase B.

Tabela 15 – Tensões nas barras do sistema teste com aplicação de defeitos de abertura.

| Situação | Tensões na fase B (em módulo) | | | |
|---------------------|--------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| | B1 (pu) | B2 (pu) | B3 (pu) | B4 (pu) |
| Normal | 1,0433 | 1,0374 | 1,0365 | 1,0363 |
| Defeito na linha L1 | 1,0479 | 0,30 | 0,30 | 0,30 |
| Defeito na linha L2 | 1,0440 | 1,0387 | 0,39 | 0,39 |
| Defeito na linha L3 | 1,0434 | 1,0376 | 1,0369 | 0 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

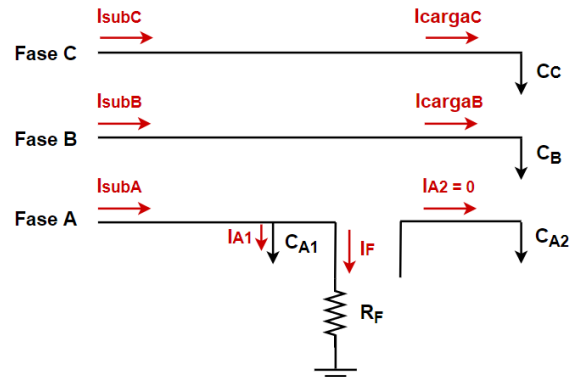
De acordo com as informações, pode-se notar que o lado rompido mais próximo à subestação do sistema apresenta nível de tensão próximo ao normal, enquanto o lado oposto possui nível de tensão bem inferior, porém diferente de zero (existe tensão induzida das demais fases sãs para a fase defeituosa). Então, para a detecção deste tipo de falta através de medições de tensão, seria mais conveniente a presença de medidores localizados após o ponto de falta.

2.4 CARACTERÍSTICAS DOS DEFEITOS SIMULTÂNEOS

Este tipo de defeito é caracterizado pela combinação dos dois tipos de defeitos anteriormente citados, ou seja, abertura de determinado condutor com contato de algum dos lados abertos com uma superfície de contato. O lado em contato com o solo pode ser o mais próximo à subestação de energia ou o mais próximo às cargas.

Com o objetivo de elucidar melhor as características de cada subdivisão dos defeitos simultâneos, primeiramente um defeito com contato pelo lado mais próximo à subestação de energia foi representado no Esquema 4. Para a exemplificação, o defeito foi aplicado na fase A, enquanto as demais fases operavam sob condições normais.

Esquema 4 – Defeito simultâneo com contato pelo lado mais próximo à subestação de energia.



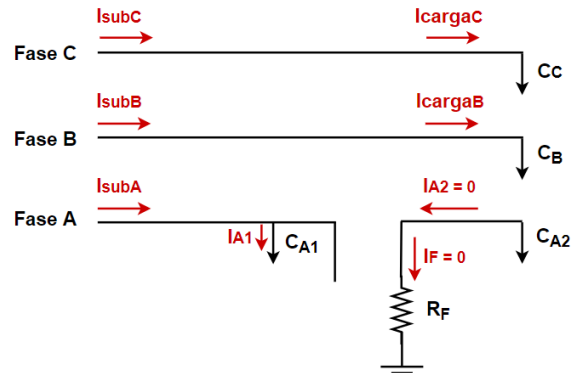
Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar que este tipo de defeito apresenta as características de ambos os defeitos anteriormente citados (contato e abertura). Sendo assim, a corrente medida na saída da subestação de energia apresenta comportamento de decrescimento devido ao defeitos de abertura e crescimento devido ao defeito de contato, de acordo com a Equação (4).

$$I_{\text{subA}} = I_{\text{cargaA}} - I_{A2} + I_F \quad (4)$$

Da mesma forma, um defeito com contato pelo lado mais próximo à carga foi representado no Esquema 5. Para a exemplificação, o defeito foi aplicado na fase A, enquanto as demais fases operavam sob condições normais.

Esquema 5 – Defeito simultâneo com contato pelo lado mais próximo à carga.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para este tipo de defeito, observa-se que o defeito de contato não será alimentado por correntes, pois não há transformadores após o ponto de falta que possibilite a existência de correntes de retorno e também porque não há geração distribuída. Dessa maneira, este tipo de defeito possui características semelhantes aos defeitos de abertura sem contato, onde a corrente medida na subestação apresenta decréscimos de corrente, conforme a Equação (5).

$$I_{\text{subA}} = I_{\text{cargaA}} - I_{A2} \quad (5)$$

Para analisar quantitativamente as características dos defeitos simultâneos, estes foram aplicados no sistema teste para a observação de alguns resultados.

Primeiramente, a Tabela 16 mostra os módulos das correntes aferidas na fase C da subestação de energia, mediante aplicação de defeitos simultâneos na mesma fase das linhas L1, L2 e L3, com contato pelo lado mais próximo à subestação e com variadas resistências de defeito.

Tabela 16 – Dados obtidos referentes aos defeitos simultâneos com contato ao solo pelo lado mais próximo à subestação de energia.

| Situação | Resistência de defeito (Ω) | Corrente aferida na subestação (em módulo) |
|---------------------|---|---|
| Carregamento normal | - | 102,26 A |
| Falta em L1 | 100 | 83,35 A |
| | 150 | 55,59 A |
| | 200 | 41,71 A |
| Falta em L2 | 100 | 171,41 A |
| | 150 | 144,49 A |
| | 200 | 131,06 A |
| Falta em L3 | 100 | 179,37 A |
| | 150 | 152,8 A |
| | 200 | 139,51 A |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o auxílio dos dados expostos, pode-se observar que as correntes aferidas na subestação dependem fortemente do ponto onde o defeito ocorreu e da impedância do contato, pois a corrente decresce de acordo com as cargas que serão desconectadas posteriormente ao defeito, mas, ao mesmo tempo, cresce inversamente proporcional ao valor da impedância de defeito.

Da mesma forma que os defeitos simultâneos mais próximos à subestação, a Tabela 17 mostra o módulo das correntes aferidas na subestação de energia, mediante aplicação de defeitos simultâneos fase C das linhas L1, L2 e L3 com contato pelo lado mais próximo às cargas (mais distante à subestação), com variadas impedâncias de defeitos.

Tabela 17 – Dados obtidos referentes aos defeitos simultâneos com contato ao solo pelo lado mais próximo às cargas.

| Situação | Resistência de defeito (Ω) | Corrente aferida na subestação (em módulo) |
|---------------------|---|---|
| Carregamento normal | - | 102,26 A |
| Falta em L1 | 100 | 0 A |
| | 200 | 0 A |
| Faltas em L2 | 100 | 91,23 A |
| | 200 | 91,23 A |
| Falta em L3 | 100 | 99,87 A |
| | 200 | 99,87 A |

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com os dados expostos pode-se perceber que este tipo de defeito é muito semelhante ao defeito de abertura. Isso ocorre porque, conforme já explicado, não há gerador para injetar corrente ou transformadores que possibilitem correntes de retorno para alimentar o defeito. Sendo assim, o defeito pode ser interpretado como diminuição das correntes de carga.

Uma característica observada com relação aos defeitos simultâneos é a variação de tensão nas barras do sistema. A Tabela 18 mostra as tensões nas barras do sistema para defeitos aplicados.

Tabela 18 – Tensões nas barras do sistema teste com aplicação de defeitos simultâneos.

| Situação | Lado de contato do defeito | Tensões na fase C (em módulo) | | | |
|---------------------|----------------------------|-------------------------------|---------|---------|---------|
| | | B1 (pu) | B2 (pu) | B3 (pu) | B4 (pu) |
| Normal | - | 1,0433 | 1,0374 | 1,0365 | 1,0363 |
| Defeito na linha L1 | Subestação | 1,0462 | 0,0306 | 0,0308 | 0,0308 |
| | Carga | 1,0478 | 0,0176 | 0,0178 | 0,0178 |
| Defeito na linha L2 | Subestação | 1,0420 | 1,0354 | 0,03672 | 0,0367 |
| | Carga | 1,0437 | 1,0378 | 0,0361 | 0,0360 |
| Defeito na linha L3 | Subestação | 1,0414 | 1,0296 | 1,0211 | 0 |
| | Carga | 1,0432 | 1,0367 | 1,0359 | 0 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se que, na ocorrência dos defeitos, o lado mais próximo à subestação do sistema apresenta nível de tensão próximo ao normal, enquanto o lado oposto possui nível de tensão bem inferior. Então, para a detecção deste tipo de defeito com medições de tensão, seria mais conveniente a alocação de medidores localizados após o ponto de falta, ou no final dos ramais de alimentadores.

2.5 CARACTERIZAÇÃO DOS DEFEITOS NOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO

Conforme observou-se nas seções anteriores, com auxílio do sistema teste, cada tipo de defeito possui características próprias que os diferem. Assim, deseja-se reunir essas características, de maneira a buscar a melhor forma de detecção para cada tipo de defeito.

Os defeitos de contato (ou em derivação) são defeitos caracterizados pela diminuição da corrente drenada do sistema à medida que aumenta-se a resistência de falta. Dessa maneira, optou-se neste trabalho por tratar somente os defeitos de alta impedância, devido a maior dificuldade de detecção pelos dispositivos convencionais de proteção dos sistemas de distribuição. As faltas de alta impedância, em muitos casos, apresentam níveis de sobrecorrentes próximos aos causados por variações de carregamento, nas quais os sistemas de distribuição

estão sujeitos ao longo do dia. Dessa maneira, as variações de carregamento são os principais dificultadores do processo de detecção de defeitos, inclusive para a utilização das redes neurais.

Para a detecção desse tipo de defeito, serão utilizadas as correntes medidas na subestação de energia e em outras linhas do sistema, caso se opte por dividir o sistema em áreas com a alocação de mais medidores (vide). Análises sobre as relações entre as correntes de sequência zero e positiva na detecção destes defeitos também serão realizadas.

Os defeitos de abertura (ou em série) são caracterizados por apresentarem uma diminuição do nível de corrente na fase afetada, de acordo com as cargas desconectadas que estão alocadas posteriormente ao defeito. Assim, pode-se usar esta linha de abordagem para a detecção destes defeitos. Como auxílio para o processo de detecção, pode-se fazer uso de informações a respeito do desequilíbrio entre as correntes de fase. Para tanto, propõe-se a utilização da divisão entre as correntes de sequência negativa e positiva.

Os defeitos simultâneos com contato pelo lado mais próximo à subestação são caracterizados por apresentarem diferentes valores de correntes medidos na subestação de energia, dependendo do ponto de defeito e da impedância de contato. Neste trabalho, optou-se por analisar estes defeitos quando o contato fosse estabelecido por altas impedâncias, de forma a dificultar o processo de detecção.

Já os defeitos simultâneos com contato pelo lado mais distante à subestação são caracterizados por apresentarem características semelhantes aos defeitos de abertura sem contato quando não há geradores distribuídos e transformadores posteriores ao ponto de defeito, conforme o caso dos sistemas IEEE analisados nesta dissertação. Sendo assim, para este defeito, a principal característica notada diz respeito à diminuição da corrente medida na subestação devido ao defeito.

Neste trabalho, os dois tipos de defeitos simultâneos serão introduzidos dentro de uma mesma base de dados, ou seja, as redes neurais serão utilizadas para detectar ambos os tipos de defeitos, sem distingui-los.

Outra forma de abordagem para a detecção dos defeitos de abertura e simultâneos se dá através da análise das tensões aferidas nas barras posteriores à linha em que os defeitos ocorreram. Portanto, simulações envolvendo medições em barras terminais serão também abordadas.

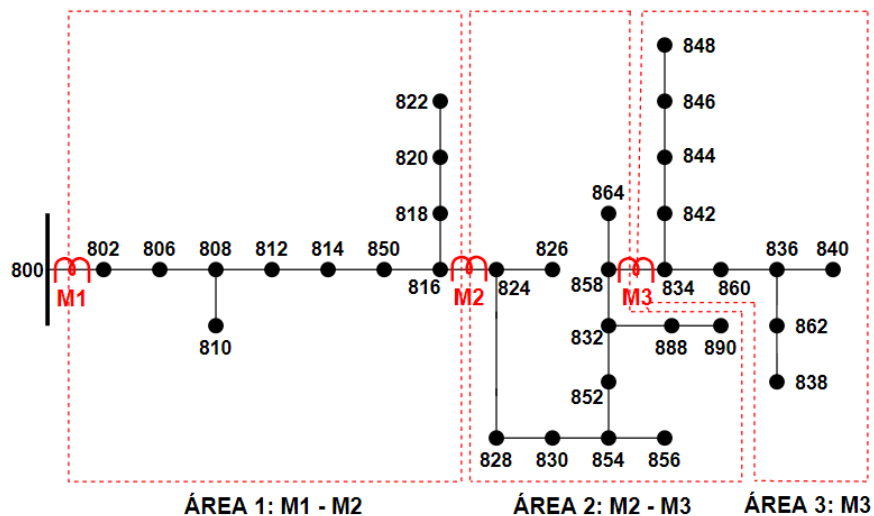
2.6 DIVISÃO EM ÁREAS

A detecção de faltas em sistemas de distribuição é uma tarefa bastante complexa devido a vários fatores. Entre eles pode-se citar o tamanho dos sistemas de distribuição em análise, ou até mesmo suas ramificações, como fatores complicadores. Muitas vezes é difícil obter-se sensibilidade para defeitos nos finais de ramais com medição apenas na subestação do sistema.

Assim, a alocação de mais medidores normalmente é muito benéfica para a tarefa de detecção de faltas, pois aumenta a observabilidade ao sistema trabalhado. Neste trabalho, utiliza-se um conceito de divisão em áreas para os sistemas. Dessa forma, a detecção de defeitos torna-se uma tarefa individual para cada área, isto é, cada área terá uma rede neural específica para detecção de defeitos dentro dela. Mais informações sobre o funcionamento de redes neurais artificiais podem ser observadas no Apêndice A.

Cada área é limitada por medidores e nós terminais. Sendo assim, o número de medidores alocados no sistema define também o número de áreas que o sistema possui. Um exemplo desse conceito pode ser visualizado na Figura 2, onde divide-se o sistema IEEE 34 barras em três áreas.

Figura 2 – Divisão em áreas do sistema IEEE 34 barras.

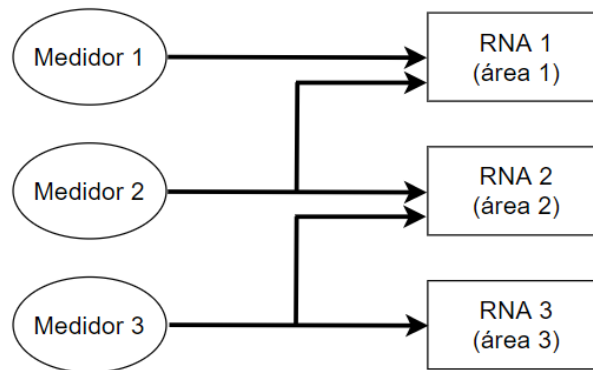


Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se perceber que a área 1 é definida pelos medidores M1 e M2, a área 2 é definida pelos medidores M2 e M3 e a área 3 apenas pelo medidor M3. Sendo assim, para cada uma

dessas áreas haverá uma rede neural com a finalidade de detectar os defeitos internos a cada uma delas (região interior a linha tracejada vermelha). Além disso, em cada rede neural utiliza-se como dados de entrada a medição realizada em todos os medidores que compõem a borda da área, conforme o Esquema 6, referente ao exemplo anterior.

Esquema 6 – Divisão em áreas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A divisão do sistema em áreas traz alguns benefícios. Uma das vantagens é que o sistema é dividido e, em consequência, a detecção é realizada para um espaço físico menor, aumentando a capacidade de sensibilidade dos medidores, e por conseguinte, aumentando as eficiências das redes neurais. Outra vantagem é quanto a localização das faltas, pois o espaço físico de inspeção no sistema para encontrar o defeito é menor quanto maior o número de áreas definidas.

2.7 PREMISSAS PARA OS TESTES DE DETECÇÃO DE DEFEITOS

Algumas premissas consideradas neste trabalho são explicadas nesta seção para melhor entendimento do trabalho.

A primeira premissa utilizada neste trabalho é que os defeitos a serem detectados são do tipo monofásico. Essa ideia é justificada pelo fato de que muitas pesquisas apontam que mais do que 80% dos defeitos em linhas de distribuição e de transmissão de energia são do tipo monofásico e, além disso, estima-se que a maior parte dos defeitos bifásicos e trifásicos são provenientes de evoluções nos defeitos monofásicos. Sendo assim, em todas as simulações deste trabalho, foram aplicados apenas defeitos monofásicos.

Outra premissa deste trabalho é que, em todas as simulações realizadas, os defeitos foram aplicados no meio da linha de distribuição. Sabe-se que um defeito, seja de contato ou de abertura, está sujeito a ocorrer em diferentes posições da linha. No entanto, considerando o comprimento dessas linhas (normalmente bem menores que as linhas de transmissão), não se observa grandes variações nos parâmetros de análise dos defeitos (tensões e correntes), mediante a posição do defeito. Neste trabalho, esta consideração simplifica valiosamente as simulações.

Outro ponto importante é quanto à definição de faltas de alta impedância (FAIs). Na literatura existem muitas definições diferentes para este termo, algumas voltadas à características de arco-elétrico presentes nas faltas, outras voltadas para um certo valor de corrente que caracteriza as FAIs e outras ainda voltadas a definição de um valor de impedância que define esses defeitos. Dessa forma, não há um consenso geral ou uma definição exata quanto aos defeitos de alta impedância. Apenas para ilustrar, algumas das principais características apontadas quanto às FAIs, segundo Arias (2014) e Souza (2017), são:

- 1) Presença de arcos-elétricos: a proximidade dos cabos energizados de algumas superfícies associadas com a alta diferença de potencial existente, frequentemente, pode originar arcos-elétricos.
- 2) Assimetria: as correntes de defeito possuem valores de pico diferentes para os ciclos positivos e negativos de corrente.
- 3) Não-linearidade: a FAI possui comportamento de uma resistência não-linear, ou seja, a curva entre tensão e a corrente, no domínio do tempo, não é linear.
- 4) Intermitência: as faltas podem interromper, por alguns instantes, o contato com a superfície ou, os arcos elétricos podem ser interrompidos e estabelecidos.
- 5) *Buildup*: as correntes de falta vão gradativamente e lentamente sendo incrementadas devido à acomodação física do cabo.
- 6) *Shoulder*: valor máximo constante atingido pelas correntes de falta durante alguns ciclos.
- 7) Presença de harmônicas: devido à presença dos arcos elétricos, frequentemente observa-se também, harmônicas com frequências mais elevadas, normalmente de ordem ímpares.

- 8) Baixa magnitude das correntes: normalmente as FAIs são originadas do contato entre os cabos com superfícies de alta impedância. Dessa forma, observa-se baixa corrente de defeito para esse tipo de falta.

Dessa forma, na literatura, encontram-se muitos trabalhos que buscam modelar as FAIs utilizando diversos componentes elétricos, tentando produzir as características anteriormente mencionadas. No entanto, nem todas elas estão relacionadas ao contexto deste trabalho. Como o interesse deste trabalho com as FAIs é apenas quanto ao aumento de corrente causado por estes defeitos, as mesmas serão trabalhadas apenas como resistências que realizam o contato de uma fase energizada com o solo. Então, outra premissa adotada por este trabalho é que as FAIs são puramente resistências elétricas, que fazem contato com superfícies de alta impedância.

Para auxiliar na ideia proposta, a Tabela 19 mostra valores estimados para as correntes devido à faltas de alta impedância e, foi construída a partir da análise de estudos realizados em Russel *et al.* (1989), Santos *et al.* (2013), Arias (2014) e Souza (2017).

Tabela 19 – Variações de correntes típicas em faltas de alta impedância.

| Superfície | Varição da corrente de falta |
|-------------------|-------------------------------------|
| Areia | 10 – 50 A |
| Asfalto | 0 – 20 A |
| Brita | 0 – 50 A |
| Calçamento | 10 – 20 A |
| Gramma | 20 – 50A |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme pode-se observar, as correntes de falta possuem valores relativamente baixos se comparados às correntes nominais de alimentadores de distribuição reais. Então, como a corrente de falta depende tanto da resistência de contato quanto do nível de tensão do sistema, é necessário definir os valores de resistência a serem utilizados neste trabalho.

As simulações propostas são realizadas nos sistemas IEEE 13 barras e IEEE 34 barras. Portanto, a Tabela 20 mostra os limites de valores de resistência de falta possíveis de serem adotados neste trabalho, nos sistemas, de forma a não dificultar e nem facilitar a detecção.

Tabela 20 – Valores limites de resistências de faltas de alta impedância para este trabalho.

| Sistema | Nível de tensão | Resistência de falta | Corrente estimada |
|----------------|------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| IEEE 13 barras | 4,16 kV | 60 – 200 Ω | 12 – 40 A |
| IEEE 34 barras | 24,9 kV | 400 – 1500 Ω | 9,5 – 35,9 A |

Fonte: Elaborado pelo autor.

A corrente de falta estimada é baseada no cálculo da tensão de fase dividido pelos valores limites da resistência de falta, levando-se em consideração, para fins de estimação apenas, que os defeitos em derivação não abaixam a tensão do sistema. No decorrer deste trabalho diversas simulações serão realizadas. Em todas essas simulações, considera-se valores de impedâncias de falta entre os limites estabelecidos.

3 IMPLEMENTAÇÃO DOS MÉTODOS DE DETECÇÃO E IDENTIFICAÇÃO

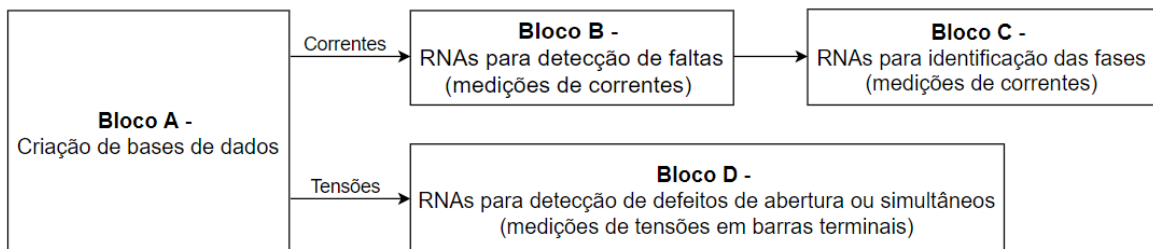
O objetivo deste capítulo é desenvolver ferramentas computacionais com métodos baseados em redes neurais artificiais para a detecção de faltas monofásicas em sistemas de distribuição. Para tanto, foram realizados testes a respeito das melhores configurações no que diz respeito as entradas das RNAs para a tarefa de detecção de defeitos, sendo que, as simulações podem ser divididas de acordo com os dados utilizados como entrada das RNAs, dividindo-se:

- 1) RNAs com entradas de correntes medidas no sistema, para detecção das FAIs, defeitos de abertura ou defeitos simultâneos;
- 2) RNAs com entradas de tensões medidas nas barras terminais do sistema, para detecção dos defeitos de abertura ou defeitos simultâneos;

Para o desenvolvimento das ferramentas computacionais, a estratégia adotada neste trabalho baseia-se na comunicação entre dois softwares: o OpenDSS que consiste em uma ferramenta para simulação de sistemas de distribuição de energia, e o Matlab que consiste em uma ferramenta de programação, capaz de criar e treinar as RNAs. Executa-se o OpenDSS através de linhas de comando do Matlab. Mais detalhes sobre os comandos do OpenDSS podem ser observados no Apêndice B.

Para o desenvolvimento dos métodos que envolvem as RNAs, torna-se necessário a criação de bases de dados para treinamento e teste das redes. Assim, a implementação computacional foi dividida em quatro blocos independentes, conforme o Esquema 7.

Esquema 7 – Fluxograma da implementação proposta.



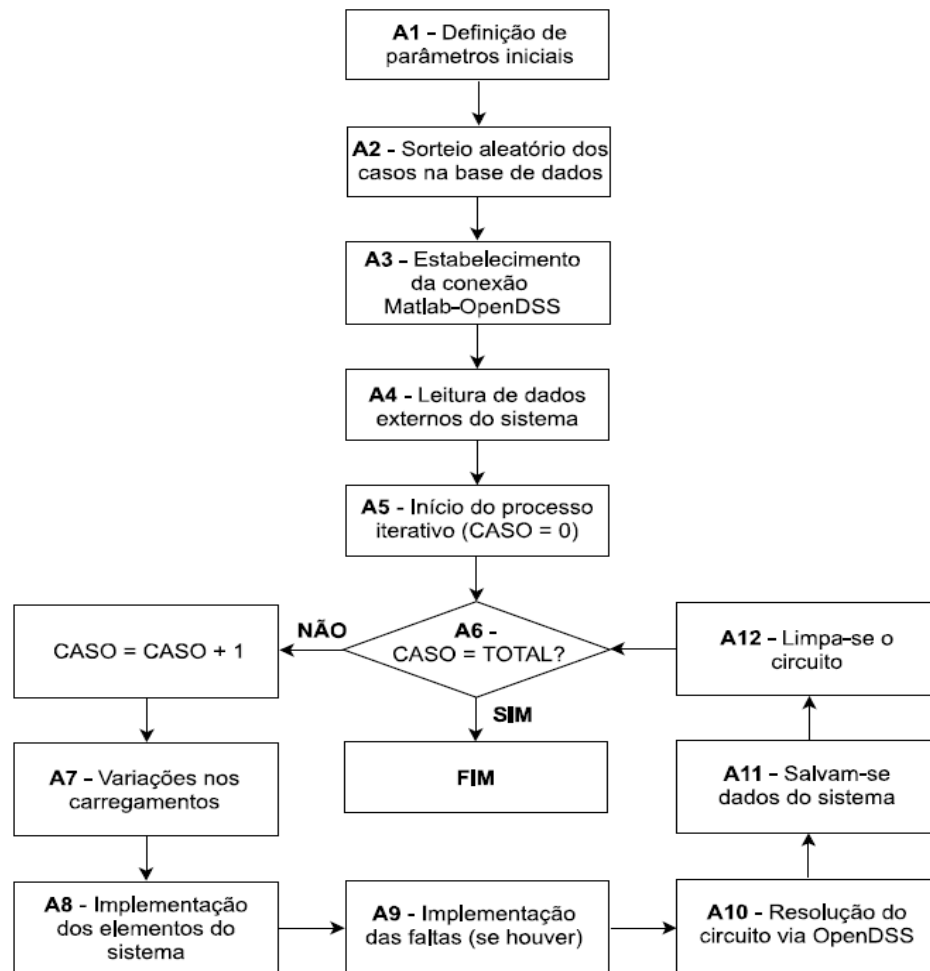
Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se perceber que o Bloco A é comum aos dois métodos propostos para detecção de defeitos. Os Blocos A, B e C serão descritos ainda neste capítulo, enquanto o bloco D será descrito em outro capítulo.

3.1 BLOCO A: BASE DE DADOS

Este bloco é responsável pela criação das bases de dados que serão utilizadas no treinamento e nos testes das RNAs. O Esquema 8 ilustra, de maneira simplificada, o funcionamento do bloco.

Esquema 8 – Fluxograma de construção da base de dados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A1 – Definição de parâmetros iniciais: neste passo são definidas informações quanto a construção de uma base de dados, tais como:

- 1) Qual sistema de distribuição será utilizado para criação de dados (IEEE 13 ou IEEE 34).
- 2) Quantos casos operativos no total (define-se a variável TOTAL) serão simulados para compor a base de dados.
- 3) Por qual tipo de defeito estará sujeita a base de dados criada (contato com impedância, abertura de condutor ou simultâneos).
- 4) Valor mínimo e máximo que estarão sujeitas as cargas para variações de carregamento.

A2 – Sorteio aleatório dos casos na base de dados: neste passo, define-se as características relacionadas as faltas para cada caso simulado (define-se a variável CASO), tais como:

- 1) Para cada caso simulado é definido se haverá ou não algum defeito. Dessa forma, havendo casos com e sem defeitos na base, o problema torna-se mais condizente com a realidade.
- 2) Nos casos com defeitos, em qual linha do sistema ocorrerá o defeito e, em qual fase da linha selecionada ocorrerá o defeito.
- 3) Qual a impedância da falta nos casos com defeitos de contato e simultâneos.

A3 – Estabelecimento da conexão Matlab-OpenDSS: neste passo, são utilizados códigos que estabelecem a conexão entre os softwares, para que os comandos comuns do OpenDSS possam ser executados através de linhas de comando no Matlab. Também neste passo, a comunicação é verificada através de um teste rápido.

A4 – Leitura de dados externos do sistema: neste passo, os dados referentes ao sistema de distribuição escolhido para a simulação são lidos pelo Matlab. Estes dados são compostos por todos os equipamentos do sistema, como as linhas, cargas, transformadores, reguladores, entre outros. Estes dados são lidos para que possam ser executados internamente, no Matlab.

A5 – Início do processo iterativo: a partir deste passo, o processo torna-se iterativo, vasculhando-se cada caso criado na base de dados (conforme o passo **A2**). A variável CASO, com valor inicial nulo, será incrementada em cada ciclo iterativo, até o valor máximo.

A6 – CASO = TOTAL?: Para verificar se todos os casos já foram simulados, é necessário que após cada iteração a variável CASO seja comparada à variável TOTAL que armazena a quantidade total de casos criados. Dessa forma, se ambas forem iguais o processo está finalizado. Caso contrário, a variável CASO é incrementada de uma unidade e o processo avança para o passo **A7**.

A7 – Variações nos carregamentos: nesta etapa, realiza-se a variação das cargas alocadas no sistema. Cada uma delas é multiplicada por um número aleatório dentro do intervalo definido para a variação (conforme o passo **A1**). Os sistemas de distribuição de energia estão localizados mais próximos às cargas e, assim, estão susceptíveis à variações no seu carregamento em intervalos pequenos. Dessa forma, este passo aborda essa característica que dificulta o processo de detecção de faltas, mas que ao mesmo tempo, torna as simulações mais condizentes com a realidade. Para tanto, utilizou-se uma série com distribuição normal (para dificultar o processo de detecção).

A8 – Implementação dos elementos do sistema: neste passo, os elementos que compõem o sistema utilizado (lidos no passo **A4**) são executados através de linhas de comando no Matlab para simulação no OpenDSS. Especial atenção é dada quanto à criação das linhas nas bases de dados com defeitos de contato e defeitos simultâneos. Duas novas linhas são criadas com metade da distância da linha original e uma barra auxiliar é criada entre as duas novas linhas, para que o defeito seja aplicado exatamente na metade da linha.

A9 – Implementação das faltas: neste passo, os defeitos são executados (quando houver). Alguns comandos específicos são utilizados de acordo com o tipo de defeito da base de dados criada:

- 1) Para os defeitos de abertura e os defeitos simultâneos utiliza-se o comando “*Open Line*” do OpenDSS para abrir o condutor na fase e na linha especificadas pela base de dados.
- 2) Para os defeitos de contato e os defeitos simultâneos, a falta é criada através do comando “*New fault*” do OpenDSS com a impedância definida no passo **A2**. Este comando deve ser executado em determinada barra do sistema (necessidade do passo **A8**).

A10 – Resolução do circuito via OpenDSS: neste passo, o comando “*Solve*” do OpenDSS é executado no Matlab. Após o comando, o OpenDSS resolve o sistema através do método de injeções de correntes.

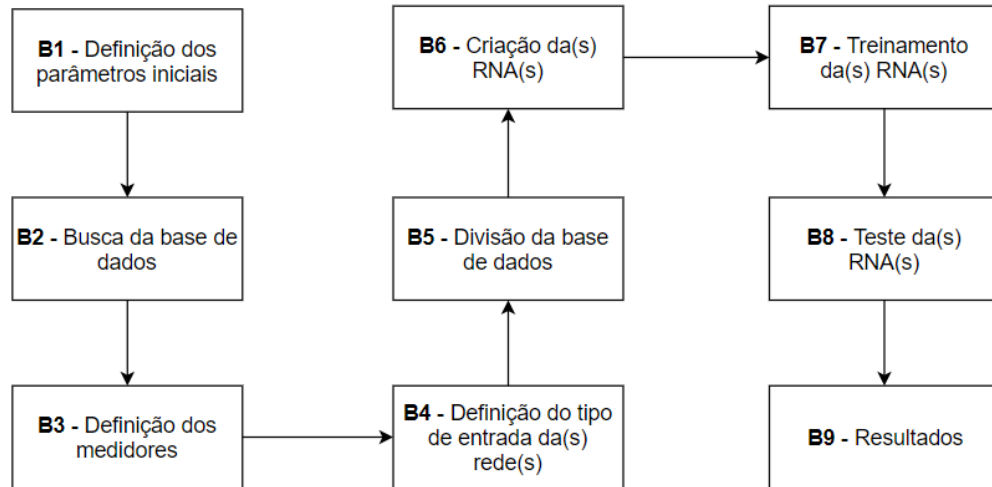
A11 – Salvam-se dados do sistema: neste passo, utiliza-se comandos de exportação de dados para um arquivo que será lido na execução dos Blocos B, C e D. Os dados salvos são as correntes nas linhas e as tensões nos barramentos do sistema utilizado.

A12 – Limpa-se o circuito: neste passo, o circuito criado é apagado no OpenDSS. A partir desse comando, os novos dados na próxima iteração (se houver) podem ser executados sem que haja conflito com as informações desta iteração. Após este passo, retorna-se para o passo **A6**.

3.2 BLOCO B: REDES NEURAIIS PARA DETECÇÃO DE FALTAS

Este bloco é responsável pela criação do método para detectar os defeitos, que se resume na criação de uma rede neural única ou na criação de uma rede neural para cada área entre medidores definida no sistema. O conceito de divisão em áreas já foi apresentado neste trabalho. O Esquema 9 ilustra, de maneira simplificada, o funcionamento deste bloco. Cada um dos passos será explicado na sequência.

Esquema 9 – Fluxograma do bloco de redes neurais para detecção de defeitos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

B1 – Definição de parâmetros iniciais: neste passo são definidas algumas informações que auxiliarão na criação, treinamento e teste da(s) RNA(s), tais como:

- 1) Quantidade total de casos que possui a base de dados do bloco A (parâmetro TOTAL).
- 2) Qual a porcentagem do total de casos da base será utilizada para testar a(s) RNA(s). Esse parâmetro é definido como DIV_TESTES (em porcentagem).

B2 – Busca da base de dados: de acordo com os dados introduzidos no passo **B1**, o algoritmo procura o diretório onde se encontra a base de dados com os resultados do bloco A. Nesta base estão contidas as correntes em todas as linhas do sistema, bem como as tensões em todas as barras do sistema. Além disso, também se encontram as informações relacionadas à localização de cada defeito em cada caso simulado, os quais serão utilizados como *targets* no treinamento das RNAs.

B3 – Definição dos medidores: neste passo define-se em quais linhas estão alocados os medidores. Em todos os casos, supõe-se que os medidores de corrente estão localizados na barra “de” da linha. Os dados de corrente da(s) linha(s) selecionada(s) são armazenados para posteriormente serem tratados e utilizados como entrada da(s) RNA(s). Para tanto, quando há mais de um medidor, é necessário realizar a divisão do sistema em áreas.

B4 – Definição do tipo de entrada da(s) rede(s): neste passo define-se como os dados serão utilizados na entrada das RNAs. As principais entradas utilizadas neste trabalho são:

- 1) Módulos das correntes de fase nas linhas desejadas (medição não-fasorial);
- 2) Módulos e ângulos das correntes de fase nas linhas desejadas (medição fasorial);
- 3) Módulos das correntes de fase + razões entre as correntes de sequência;

B5 – Divisão da base de dados: Após definir-se quais serão os tipos de dados utilizados como entradas das redes neurais, é necessário dividi-los em amostras para treinamento e amostras para teste das redes. Cabe ressaltar, que essa definição é importante para que a rede não fique excessivamente treinada, a ponto de “decorar” os resultados almejados e, ao mesmo tempo, que não fique pouco treinada e cometa muitos erros de separação dos padrões de defeito.

O parâmetro que define a porcentagem de amostras para teste das RNAs é definido no passo **B1**, em porcentagem. Dessa forma, é possível calcular, de acordo com o tamanho da base de dados (parâmetro **TOTAL**), a quantidade de amostras para teste e treinamento das redes, de acordo com a Equação (6) e a Equação (7), respectivamente.

$$A_{\text{TEST}} = \text{DIV_TESTES} \times \text{TOTAL} \quad (6)$$

$$A_{\text{TR}} = \text{TOTAL} - A_{\text{TEST}} \quad (7)$$

Em que A_{TEST} e A_{TR} são a quantidade de amostras para teste e treinamento das redes neurais, respectivamente.

B6 – Criação da(s) RNA(s): neste passo as redes neurais são criadas. Para cada rede introduz-se o número de neurônios na camada oculta, o algoritmo de treinamento que será utilizado e as funções de ativação utilizadas.

B7 – Treinamento da(s) RNA(s): neste passo os dados de entrada referentes às amostras de treinamento A_{TR} (definidas no passo **B5**), são utilizadas para treinar a(s) rede(s) e fornecer os parâmetros internos (pesos e bias dos neurônios).

B8 – Teste da(s) RNA(s): neste passo os dados de entrada referente às amostras de teste A_{TEST} (definidas no passo **B5**) são utilizadas para verificar o funcionamento da(s) rede(s). Os parâmetros obtidos pela matriz de confusão dos resultados são amostrados, sendo que se define:

- 1) VP são os verdadeiros positivos, ou seja, quando a rede indica defeito e realmente há defeito. Então, é um acerto.
- 2) VN são os verdadeiros negativos, ou seja, quando a rede indica que não há defeito e realmente não há. Então, é um acerto.
- 3) FN são os falsos negativos, ou seja, quando a rede indica que não há defeito, mas há. Então, é um erro.
- 4) FP são os falsos positivos, ou seja, quando a rede indica que há defeito, mas não há. Então, é um erro.

B9 – Resultados obtidos: neste passo os resultados referentes ao passo **B8** são mostrados. Estes resultados são dados em porcentagem total de acertos para casos com e sem defeitos no sistema ou em cada área.

A eficiência da rede neural de detecção de defeitos no sistema inteiro ou por áreas pode ser calculada através da Equação (8).

$$E_{DET}(\%) = \frac{VP + VN}{A_{TEST}} \times 100 \quad (8)$$

Em que VP são os verdadeiros positivos e VN são os verdadeiros negativos.

3.3 BLOCO C: REDES NEURAIIS PARA IDENTIFICAÇÃO DA FASE SOB DEFEITO

Neste bloco, define-se uma rede neural que detecta qual fase do sistema está sob defeito. O funcionamento deste bloco é semelhante ao bloco B. Utiliza-se a mesma base de dados do bloco B e os mesmos dados dos medidores alocados no sistema. A principal diferença entre os blocos é que utiliza-se todas as medições realizadas no sistema como entrada desta rede. Então, se o sistema for dividido em áreas no bloco B, todas as informações referentes a todos os medidores alocados são utilizadas para treinamento desta rede.

Uma outra peculiaridade deste bloco é quanto ao passo que mede a eficiência da rede neural de detecção das fases sob defeito. Isso porque somente são analisados os acertos em casos com defeito, pois esta rede só será realmente observada se a(s) rede(s) de detecção do defeito indicar(em) defeito no sistema. Caso contrário, o resultado mostrado na saída desta rede pode ser ignorado.

Assim, as redes neurais utilizadas para identificação da fase defeituosa pode apresentar três resultados distintos, indicando defeito em uma das fases. A eficiência dessas redes neurais pode ser calculada através da Equação (9).

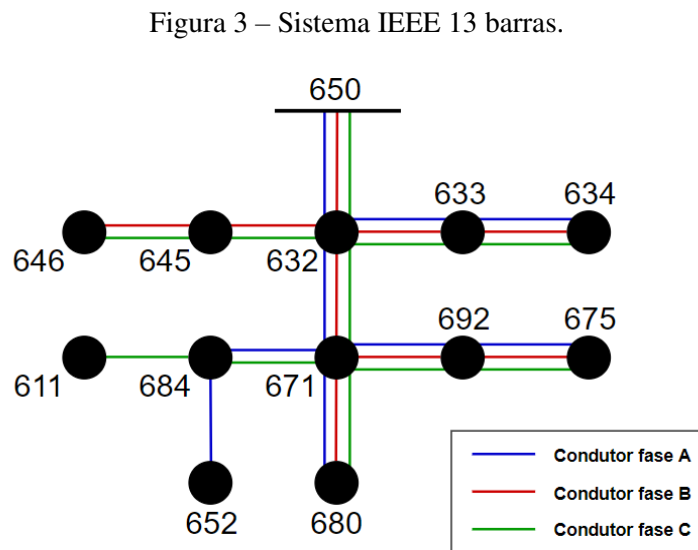
$$E_{ID}(\%) = \frac{N_{DEF-A} + N_{DEF-B} + N_{DEF-C}}{N_{DEF}} \times 100 \quad (9)$$

Em que N_{DEF-A} , N_{DEF-B} e N_{DEF-C} são o número de defeitos que a rede neural indicou corretamente nas fases A, B e C, respectivamente. N_{DEF} é o número total de defeitos contidos na base de dados para teste das RNAs.

3.4 SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZADOS

Nas simulações computacionais apresentadas neste trabalho utilizou-se os sistemas de distribuição do IEEE, com 13 barras e 34 barras. Esses sistemas possuem as cargas conectadas diretamente na média tensão e são naturalmente desequilibrados.

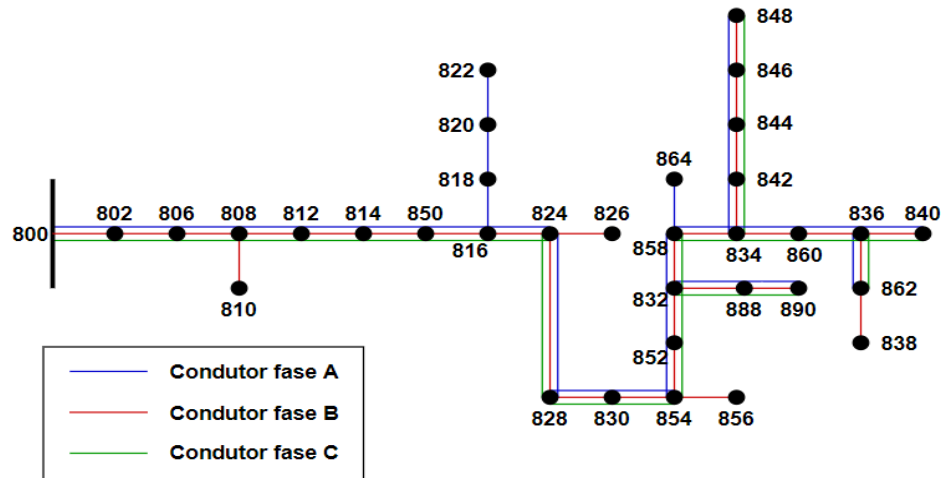
A Figura 3 representa esquematicamente o sistema IEEE 13 barras adaptado para este trabalho. Pode-se observar que este sistema possui linhas monofásicas, bifásicas e trifásicas. Neste trabalho, optou-se por remover o transformador originalmente encontrado entre as barras 633 e 634, para que se trabalhe com apenas um nível de média tensão. O regulador de tensão originalmente encontrado na linha 650-632 no sistema original, apesar de não estar indicado, foi considerado nas simulações, de acordo com o modelo disponibilizado no OpenDSS. Este sistema é caracterizado por apresentar um nível de carregamento elevado e por ser bastante ramificado.



Fonte: Adaptado de IEEE PES (2020).

A Figura 4 representa esquematicamente o sistema IEEE 34 barras adaptado para este trabalho. Pode-se observar que diferentemente do sistema IEEE 13 barras, este sistema apresenta apenas linhas monofásicas ou trifásicas. Além disso, também optou-se, neste sistema, por remover o transformador originalmente encontrado entre as barras 888 e 890, para que se trabalhe com apenas um nível de média tensão. Os reguladores de tensão originalmente encontrados nas linhas 814-850 e 852-832 do sistema original, apesar de não estarem indicados, foram considerados nas simulações, de acordo com o modelo disponibilizado no OpenDSS. Este sistema é caracterizado por apresentar um nível de carregamento mais baixo e por ser menos ramificado se comparado ao IEEE 13 barras.

Figura 4 – Sistema IEEE 34 barras.



Fonte: Adaptado de IEEE PES (2020).

3.5 CARACTERÍSTICAS DAS REDES NEURAIAS

No desenvolvimento dos métodos para detecções dos defeitos foram utilizadas várias redes neurais durante as simulações. Além disso, para cada tipo de defeito foram analisados diferentes tipos de entrada para testar a eficiência das redes. Os tipos de entrada tratados ficarão mais evidentes no próximo capítulo desta dissertação.

Ademais, as características internas de todas as RNAs definidas para detecção de defeitos envolvendo medições de correntes são semelhantes. Essas características foram definidas de acordo com alguns testes previamente realizados no sistema. No entanto, conforme explicado, a arquitetura dessas redes variam com o tipo de entrada, que por sua vez dependem do tipo de defeito simulado, do tipo de medição realizado e do número de medidores ligados nas redes. Então, algumas das principais características internas que são comuns a essas redes neurais estão apresentadas na Tabela 21.

Tabela 21 – Informações gerais sobre as redes neurais definidas nos métodos de detecção com medição de correntes.

| Característica | Discriminação |
|----------------------------------|------------------------------------|
| Tipo de rede | <i>Feedforward backpropagation</i> |
| Algoritmo de treinamento | <i>Scaled conjugate gradient</i> |
| Quantidade de camadas ocultas | 1 |
| Função de ativação dos neurônios | Tangente sigmoide |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma das características que não foi informada é a quantidade de neurônios contidos na camada oculta de cada RNA. Isso porque este número varia de método para método e depende do tipo de medição e da quantidade deles. Nota-se que cada RNA pode ter como entrada dados relacionados a um, dois ou três medidores. Os resultados obtidos com a utilização de mais do que três medidores não apresentou ganhos significativos, não justificando a apresentação neste trabalho. Uma maior quantidade de medidores no sistema está relacionado à divisão do sistema em áreas.

Para os defeitos que envolvem medições de correntes nos sistemas de distribuição simulados, a Tabela 22 mostra a quantidade de neurônios na camada oculta com a qual cada RNA dos blocos B e C foi configurada dependendo do tipo de defeito analisado, do tipo de medição realizado e da quantidade de medidores conectados às redes. O número de neurônios definidos foram configurados a partir de testes prévios envolvendo várias estruturas de redes neurais tanto para a detecção quanto para a identificação de defeitos.

Tabela 22 – Quantidade de neurônios na camada oculta das RNAs de detecção de defeitos com medições de correntes.

| Tipo de defeito | Tipo de medição | Número de medidores conectados na rede neural | Neurônios na camada oculta |
|--|--------------------------|--|-----------------------------------|
| | | 1 | 3 |
| | Não-fasorial | 2 | 6 |
| | | 3 | 9 |
| Contato e abertura (medição de corrente) | | 1 | 4 |
| | Não-fasorial e sequência | 2 | 8 |
| | | 3 | 12 |
| | | 1 | 6 |
| | Fasorial | 2 | 12 |
| | | 3 | 18 |
| Simultâneos (medição de corrente) | | 1 | 3 |
| | Não-fasorial | 2 | 6 |
| | | 3 | 9 |
| | | 1 | 5 |
| | Não-fasorial e sequência | 2 | 10 |
| | | 3 | 15 |
| | | 1 | 6 |
| | Fasorial | 2 | 12 |
| | | 3 | 18 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

4 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE DETECÇÃO DE DEFEITOS COM MEDIÇÕES DE CORRENTE

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nas simulações realizadas com as redes neurais desenvolvidas envolvendo medições de corrente. Em cada seção apresenta-se um tipo de simulação referente aos defeitos estudados neste trabalho. Foram utilizados os sistemas IEEE 13 barras e IEEE 34 barras nas simulações. Cada resultado disposto representa a média dos resultados obtidos com a simulação de dez RNAs, para verificação da robustez dos métodos.

4.1 FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

Resumindo, este tipo de defeito é caracterizado pelo contato de uma fase do sistema com uma superfície de alta impedância, onde observa-se pequenos acréscimos de corrente de falta. Para esse tipo de defeito, utilizou-se o sistema IEEE 13 barras para verificação da influência do tipo de medição realizado e o sistema IEEE 34 barras para verificação da influência da quantidade de medidores. Maiores informações a respeito dos tipos de medição utilizados podem ser observadas no Apêndice C.

4.1.1 Simulações no sistema IEEE 13 barras

As simulações no sistema IEEE 13 barras foram realizadas com intuito de verificar a influência que o tipo de medição utilizado exerce no processo de detecção de faltas. Para isso, considerou-se três tipos de medições e três cenários quanto às variações de carga do sistema:

- 1) Cenário 1: variação de 30%, ou seja, cargas multiplicadas por um valor entre 0,85 e 1,15.
- 2) Cenário 2: variação de 40%, ou seja, cargas multiplicadas por um valor entre 0,80 e 1,20.
- 3) Cenário 3: variação de 60%, ou seja, cargas multiplicadas por um valor entre 0,70 e 1,30.

Nos três cenários de variação de carregamento, considerou-se a impedância de falta variando entre 80 e 200 Ω .

A Tabela 23 mostra os resultados referentes ao cálculo da eficiência das RNAs de detecção de defeitos no sistema, de acordo com a Equação (8). A primeira coluna é a referência

das RNAs utilizadas. A segunda coluna mostra quantos casos possuíam algum defeito no sistema, dentre os 400 casos de testes utilizados ($A_{TEST} = 400$). Da terceira a sexta coluna estão a média dos valores de VP, VN, FP e FN para as dez redes neurais que são criadas, conforme já explicado. A sétima coluna mostra os resultados obtidos para a eficiência de cada rede.

Tabela 23 – Resultados das RNAs de detecção de defeitos de acordo com os índices de cálculo da eficiência.

| RNA | N_{DEF} | VP | VN | FP | FN | E_{DET} (%) |
|------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------------------|
| 1 | 270 | 264,9 | 127,5 | 5,1 | 2,5 | 98,10 |
| 2 | 286 | 280,8 | 98,10 | 5,2 | 15,9 | 94,73 |
| 3 | 269 | 249,0 | 114,3 | 20,0 | 16,7 | 90,83 |
| 4 | 270 | 264,7 | 128,5 | 5,3 | 1,5 | 98,30 |
| 5 | 286 | 277,0 | 106,5 | 9,0 | 7,5 | 95,88 |
| 6 | 269 | 252,3 | 117,0 | 16,7 | 14,0 | 92,33 |
| 7 | 270 | 270,0 | 130,0 | 0,0 | 0,0 | 100,00 |
| 8 | 286 | 285,2 | 113,9 | 0,8 | 0,1 | 99,78 |
| 9 | 269 | 268,3 | 129,0 | 0,70 | 2,0 | 99,33 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Da mesma forma, a Tabela 24 mostra os resultados referentes ao cálculo da eficiência das RNAs de identificação de defeitos no sistema, de acordo com a Equação (9). A primeira coluna é a referência das RNAs utilizadas. A segunda coluna mostra quantos casos possuíam algum defeito no sistema, dentre os 400 casos de testes utilizados ($A_{TEST} = 400$). A terceira coluna mostra a média dos defeitos encontrados nas três fases para as dez redes neurais que são criadas, conforme já explicado. A quarta coluna mostra o resultado obtido para a eficiência de cada rede.

Cabe ressaltar que a Tabela 23 e a Tabela 24 foram inseridas apenas para demonstrar o processo de cálculo das eficiências das RNAs, mediante auxílio da Equação (8) e da Equação

(9), respectivamente. No entanto, considera-se que os resultados ficam mais evidentes mediante apresentação sob forma de figuras.

Tabela 24 – Resultados das RNAs de identificação de defeitos de acordo com os índices de cálculo da eficiência.

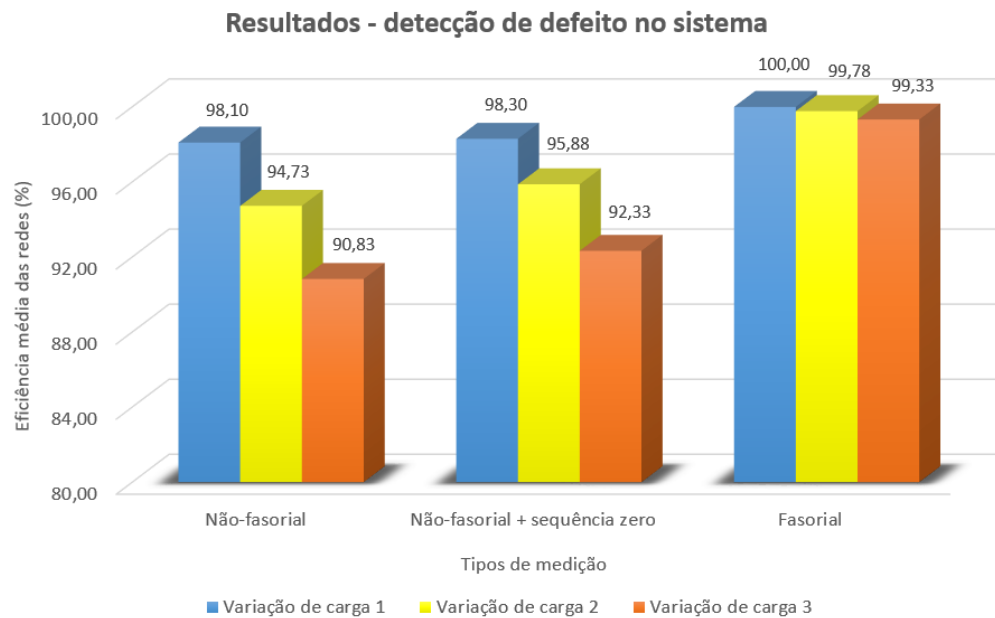
| RNA | N_{DEF} | N_{DEF-A} + N_{DEF-B} + N_{DEF-C} | E_{DET} (%) |
|------------|------------------------|--|----------------------------|
| 1 | 270 | 259,8 | 96,22 |
| 2 | 286 | 273,2 | 95,52 |
| 3 | 269 | 250,1 | 92,97 |
| 4 | 270 | 266,8 | 98,81 |
| 5 | 286 | 278,9 | 97,52 |
| 6 | 269 | 261,4 | 97,17 |
| 7 | 270 | 270,0 | 100,0 |
| 8 | 286 | 286,0 | 100,0 |
| 9 | 269 | 269,0 | 100,0 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, o Gráfico 1 e o Gráfico 2 mostram os resultados obtidos pelas RNAs de detecção e de identificação das FAIs, respectivamente, quanto aos cenários de carregamento e variando-se entre os tipos de medições: não-fasorial, não-fasorial com adição da divisão entre as correntes de sequência zero e positiva e medição fasorial.

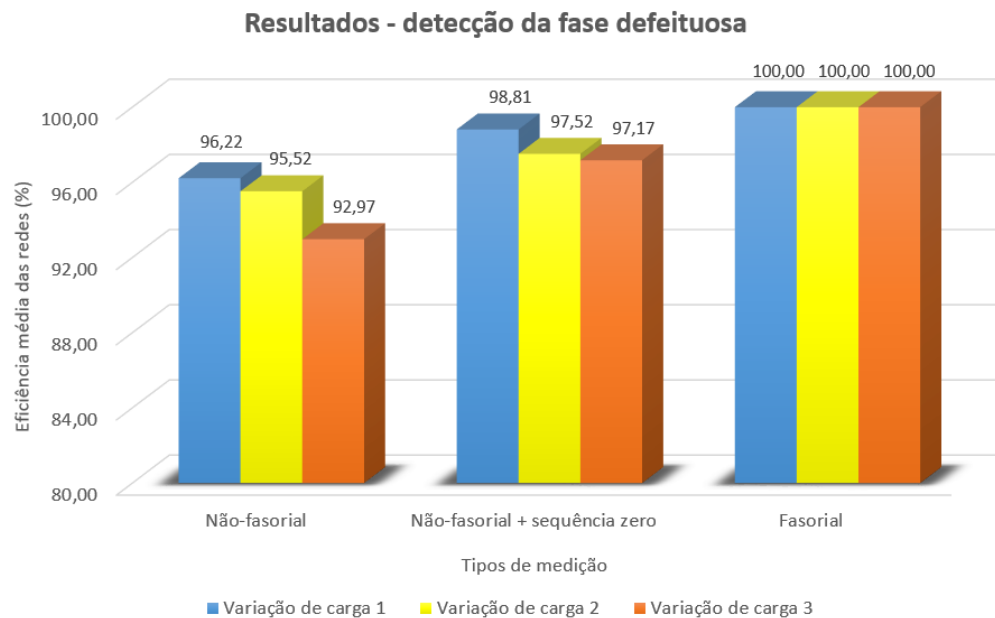
Conforme pode-se observar, os resultados do Gráfico 1 e do Gráfico 2 são os mesmos mostrados na Tabela 23 e na Tabela 24, respectivamente. Então, nas demais análises de defeitos realizadas neste capítulo, para evitar repetição de resultados, serão mostrados apenas os resultados sob a forma de figuras.

Gráfico 1 – Resultados obtidos para RNAs de detecção de faltas de alta impedância no sistema IEEE 13 barras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 2 – Resultados obtidos para RNAs de identificação de faltas de alta impedância no sistema IEEE 13 barras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

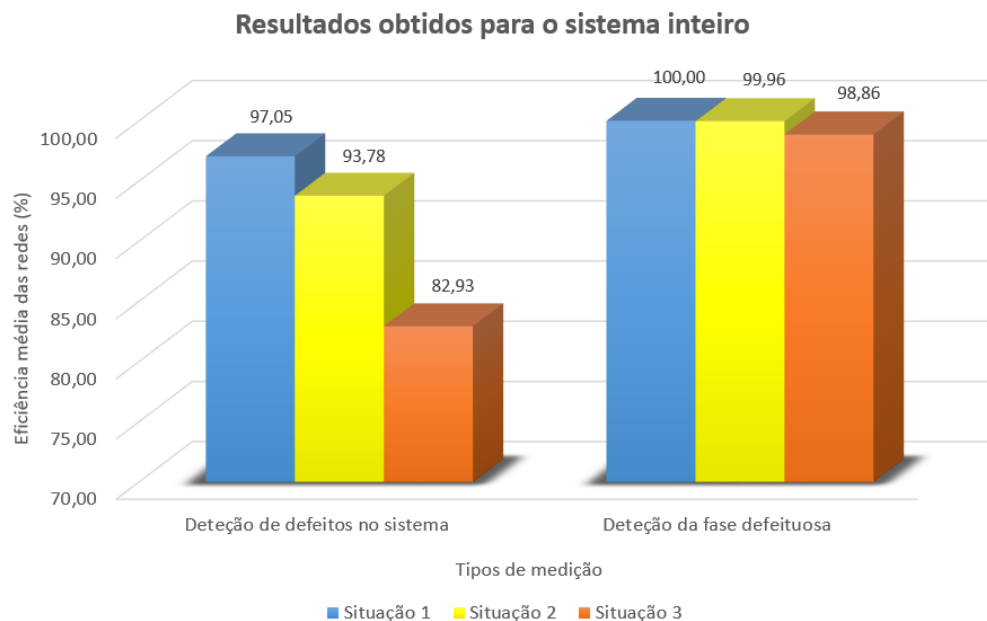
4.1.2 Simulações no sistema IEEE 34 barras

As simulações no sistema IEEE 34 barras foram realizadas com intuito de verificar a influência que a quantidade de medidores utilizados exerce no método de detecção das FAIs. Foram consideradas três situações com relação à variação de carregamento e impedância das faltas:

- 1) Situação 1: variação de carregamento de 60%, ou seja, cargas multiplicadas por um valor entre 0,70 e 1,30, com resistência de falta variando-se entre 800 e 1200 Ω .
- 2) Situação 2: variação de carregamento de 100%, ou seja, cargas multiplicadas por um valor entre 0,50 e 1,50, com resistência de falta variando-se entre 800 e 1200 Ω .
- 3) Situação 3: variação de carregamento de 100%, ou seja, cargas multiplicadas por um valor entre 0,50 e 1,50, com resistência de falta variando-se entre 1000 e 1500 Ω .

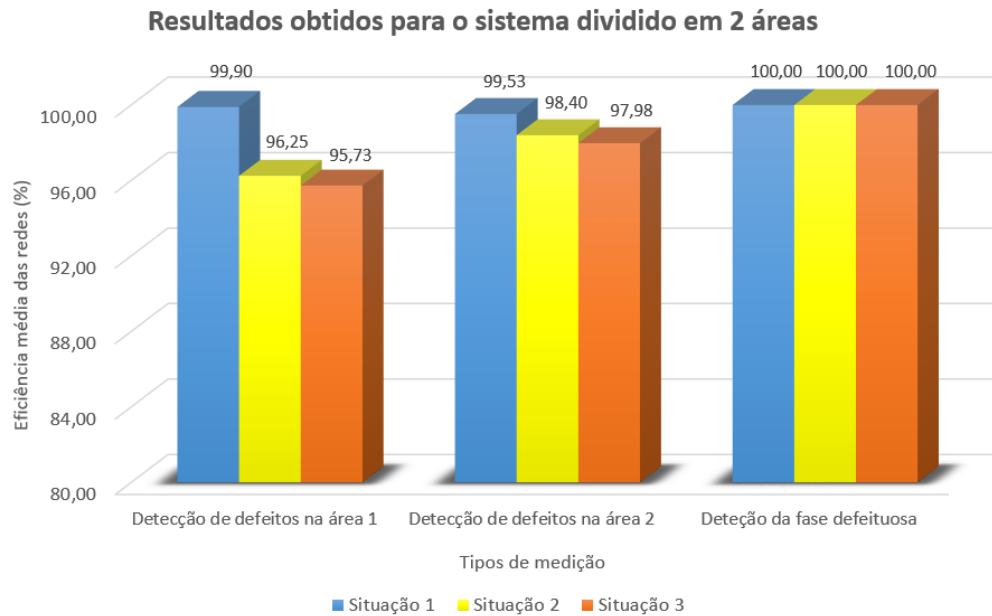
Considerou-se, nesta simulação, apenas medições do tipo não-fasorial. O Gráfico 3 mostra os resultados obtidos para as RNAs de detecção e identificação de defeitos com apenas um medidor alocado. Já o Gráfico 4 mostra os resultados obtidos, considerando-se a presença de dois medidores no sistema (subestação e linha 830-854).

Gráfico 3 – Resultados obtidos pelas RNAs no sistema IEEE 34 barras com apenas um medidor alocado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 4 – Resultados obtidos pelas RNAs no sistema IEEE 34 barras com dois medidores.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.3 Análise dos resultados obtidos

As simulações no sistema IEEE 13 barras e no sistema IEEE 34 barras foram realizadas com o intuito de avaliar a capacidade das RNAs definidas para a detecção e identificação das FAIs. Pode-se observar bons desempenhos das RNAs definidas, superiores a 90% em quase todas as simulações realizadas. Além disso, percebe-se desempenhos de 100% ou muito próximos, em boa parte das simulações.

Ficou claro que, conforme era esperado, as variações de carregamento são fatores que dificultam o processo a detecção das FAIs em sistemas de distribuição, devido ao aumento de corrente que ambos os eventos podem provocar. Analisando-se os resultados, é possível notar que quanto maior a variação de carga, em ambos os sistemas, menor o percentual de detecção das RNAs. Da mesma forma, quanto maiores as resistências de falta, mais difícil torna-se o problema de detecção dos defeitos.

Percebe-se também que as medições fasoriais acarretaram em melhores desempenhos das RNAs na detecção das FAIs se comparadas às medições não-fasoriais. No entanto, a informação acrescida pela divisão entre as correntes de sequência zero e positiva associada às

medições não-fasoriais foram úteis, melhorando a detecção de defeitos, ainda que os resultados fossem inferiores aos obtidos com as medições fasoriais.

Por fim, pode-se citar que a inclusão de mais medidores no sistema acarreta em melhores índices de detecção de faltas por área. Porém, os resultados obtidos com a utilização de mais do que dois medidores começam a ser menos significativos, justificando-se, assim, o porquê de não terem sido mostrados. A divisão em áreas ainda é útil para divisão do sistema, que por sua vez ajuda na localização de defeitos. O melhor local para alocação de medidores nos sistemas é uma tarefa que não abrange o escopo deste trabalho, mas pode ser realizado de diversas formas, como por exemplo em Acácio (2017), utilizando os algoritmos genéticos.

4.2 DEFEITOS DE ABERTURA

Este tipo de defeito é caracterizado pela abertura de um condutor de fase, desconectando as cargas localizadas a jusante deste trecho de ramal, na mesma fase defeituosa. Com isso, observa-se decréscimos de correntes de acordo com o número de cargas desconectadas. Para esse tipo de defeito, utilizou-se ambos os sistemas IEEE 13 barras e IEEE 34 barras para verificação da influência da quantidade de medidores, bem como os tipos de medições utilizados.

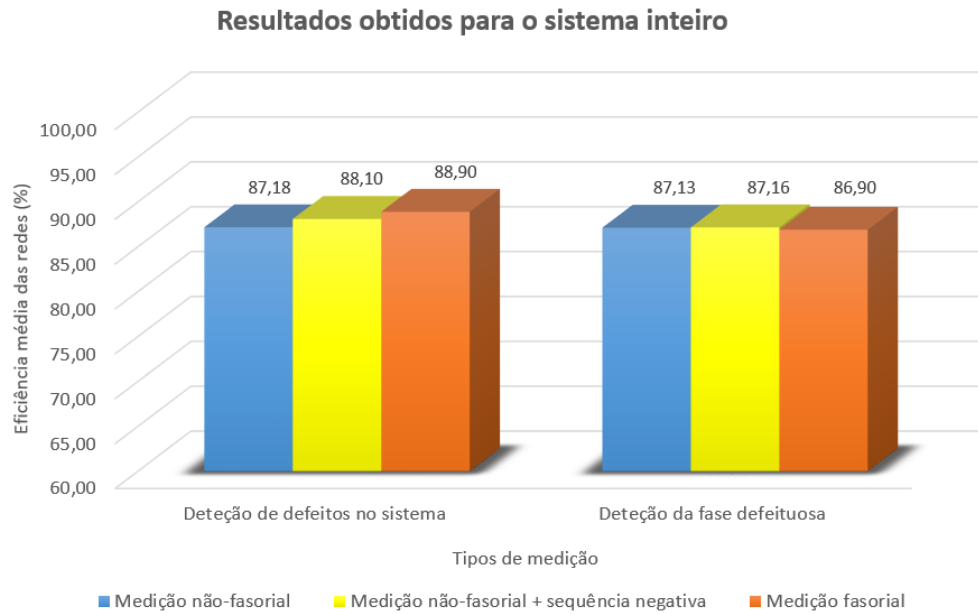
4.2.1 Simulações no sistema IEEE 13 barras

Para a análise envolvendo o sistema IEEE 13 barras, foi utilizada uma variação de carregamento de 20% nas simulações. Os tipos de medições utilizados como entradas das RNAs foram: medição não-fasorial, medição não-fasorial com adição da divisão entre as correntes de sequência negativa e positiva e medição fasorial. O Gráfico 5 ilustra os resultados obtidos variando-se os tipos de medição, com apenas um medidor alocado no sistema, localizado na subestação.

Já o Gráfico 6, ilustra os resultados obtidos com dois medidores alocados no sistema, localizados na subestação e na linha 632-671.

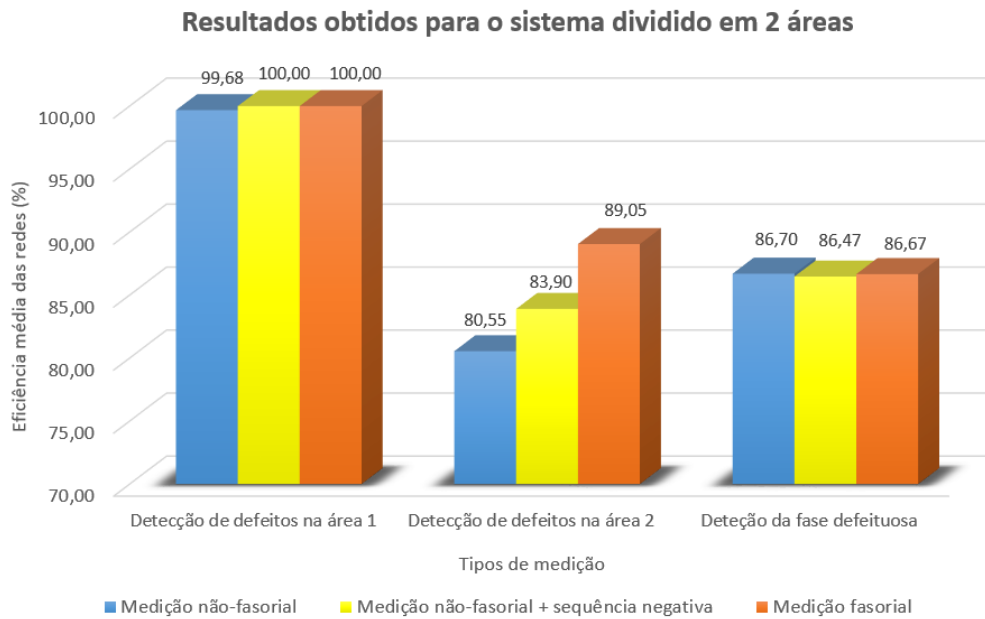
Finalmente, o Gráfico 7 ilustra os resultados obtidos com três medidores alocados no sistema, localizados na subestação, e na linhas 632-671 e 671-684.

Gráfico 5 – Resultados obtidos para defeitos de abertura no sistema IEEE 13 barras com apenas um medidor.



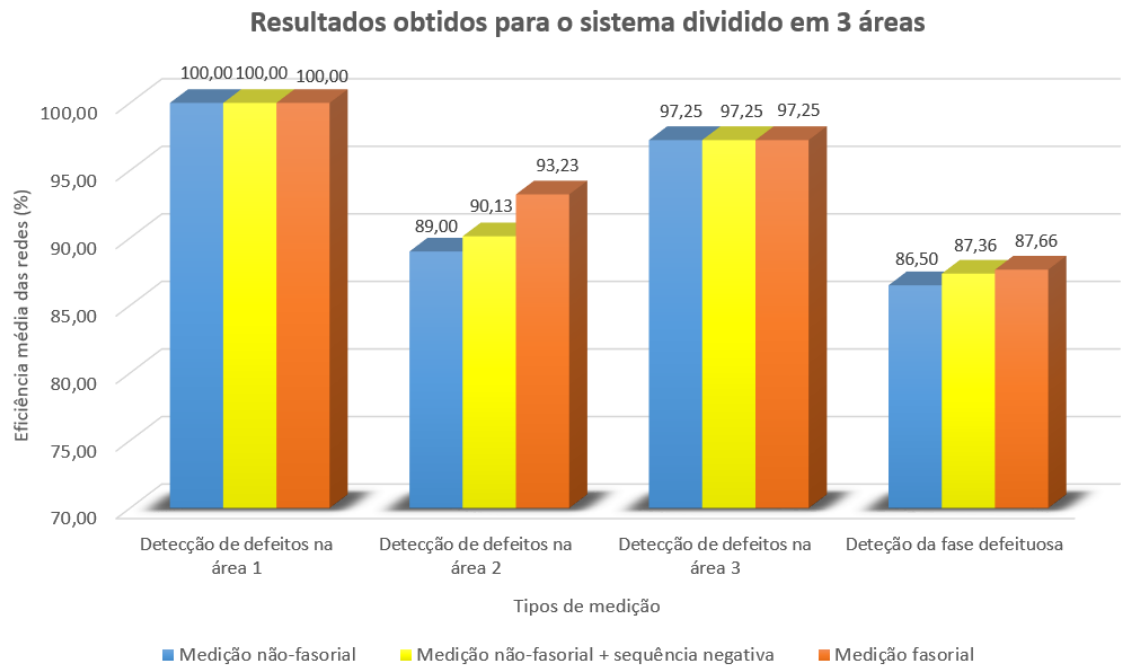
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 6 – Resultados obtidos para defeitos de abertura no sistema IEEE 13 barras com dois medidores.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 7 – Resultados obtidos para defeitos de abertura no sistema IEEE 13 barras com três medidores.



Fonte: Elaborado pelo autor.

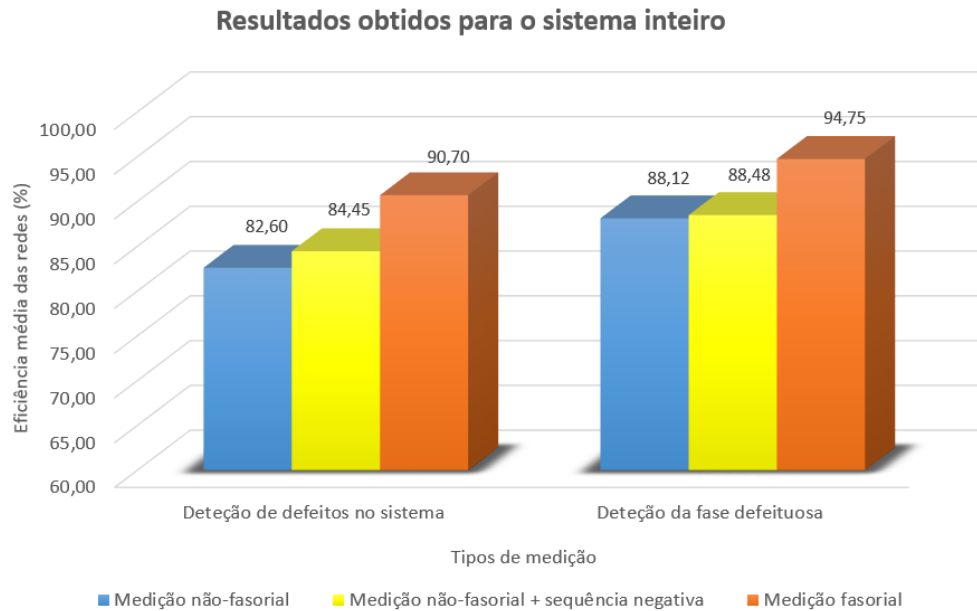
4.2.2 Simulações no sistema IEEE 34 barras

Da mesma forma que nas simulações anteriores, utilizou-se o sistema IEEE 34 barras com variação de carregamento de 20% e os mesmos tipos de medições como entradas das RNAs. O Gráfico 8 ilustra os resultados obtidos variando-se os tipos de medição utilizados, com apenas um medidor no sistema, localizado na subestação.

Já o Gráfico 9 ilustra os resultados obtidos com dois medidores alocados no sistema, localizados na subestação e na linha 860-836.

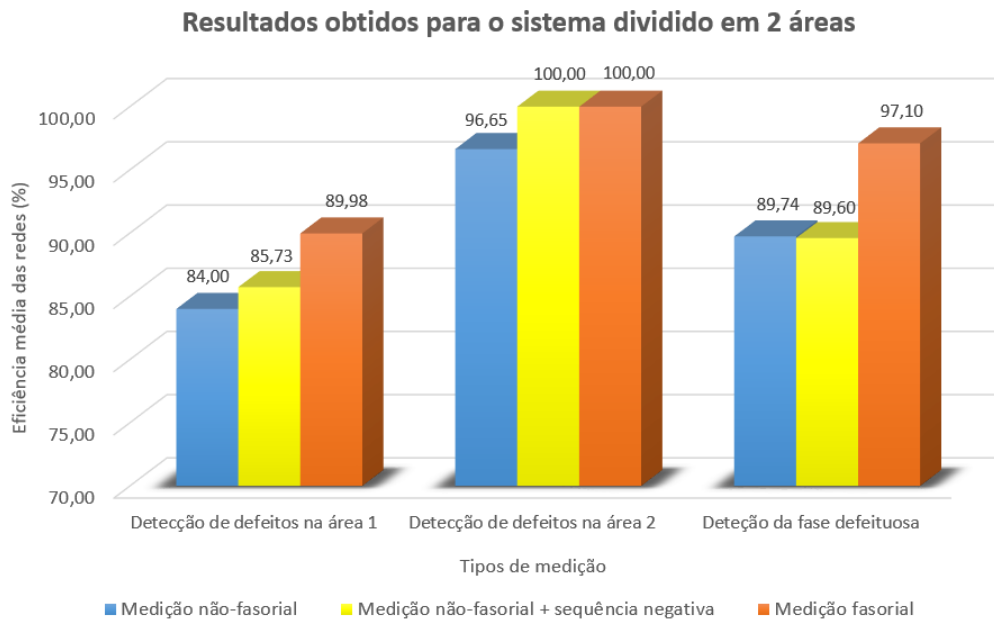
Finalmente, o Gráfico 10 ilustra os resultados com três medidores alocados no sistema, localizados na subestação, na linha 852-832 e na linha 860-836.

Gráfico 8 – Resultados obtidos para defeitos de abertura no sistema IEEE 34 barras com apenas um medidor.



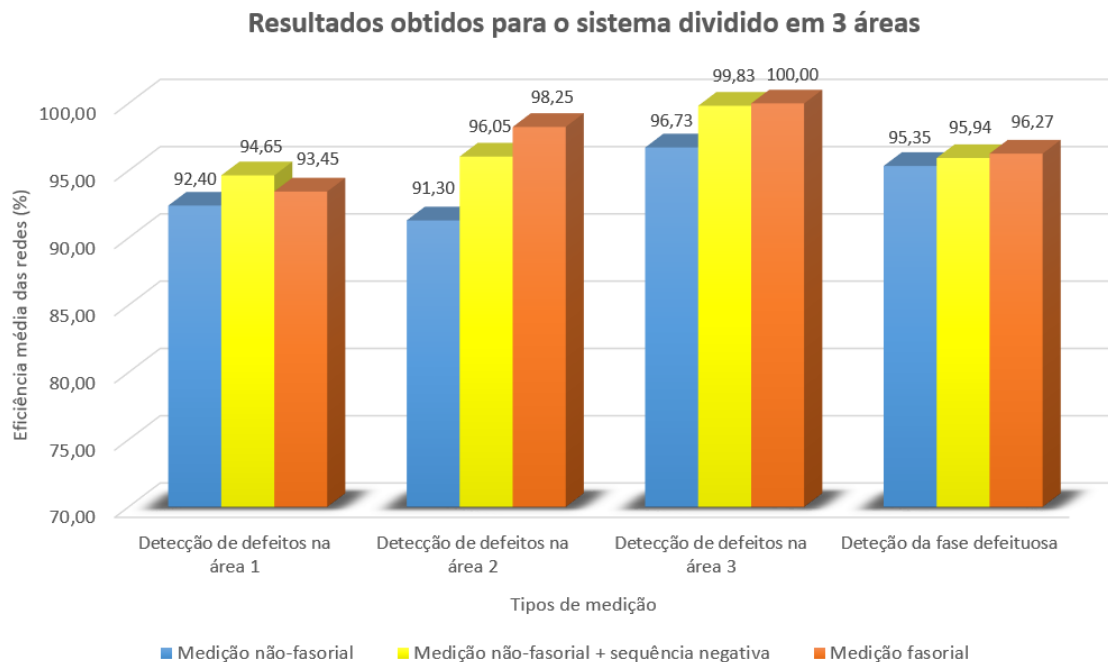
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 9 – Resultados obtidos para defeitos de abertura no sistema IEEE 34 barras com dois medidores.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 10 – Resultados obtidos para defeitos de abertura no sistema IEEE 34 barras com três medidores.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.3 Análise dos resultados obtidos

As simulações referentes aos defeitos de abertura nos sistemas IEEE 13 barras e IEEE 34 barras tiveram como principal objetivo analisar os desempenhos das RNAs definidas para o processo de detecção e identificação de defeitos. Pode-se observar que os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, na medida em que nos casos mais simples (com apenas um medidor) tiveram resultados superiores a 85%, crescendo para resultados superiores a 95% nos casos mais complexos quanto à tecnologia de medição utilizada e número de medidores alocados.

Pode-se observar nas simulações realizadas que o principal fator complicador para os defeitos de abertura estão intrínsecos no próprio problema: existe uma maior dificuldade para detecção de defeitos de abertura que ocorrem próximos ao fim dos ramais de alimentadores do sistema. Isso ocorre devido ao baixo decréscimo de corrente, observado por medidores na subestação, devido à desconexão das cargas à jusante do defeito e que, muitas vezes, podem ser confundidas com variações de carga. Sendo assim, uma possível solução seria a alocação de

medidores próximos aos fins dos ramais, onde a sensibilidade para a modificação nas correntes devido ao defeito seria maior. De fato, observou-se nas simulações que a alocação de mais medidores acarretaram em melhores resultados das RNAs por área. Porém, os resultados obtidos com a utilização de mais do que três medidores começam a ser menos significativos, justificando-se, assim, o porquê de não terem sido mostrados.

Por fim, com relação ao tipo de entrada utilizado para as RNAs definidas, pode-se perceber que as medições fasoriais geraram resultados superiores com relação as medições não-fasoriais, na maioria dos casos. Exceção às RNAs de identificação da fase defeituosa onde, em alguns casos, as medições não-fasoriais foram ligeiramente superiores. Além disso, pode-se notar também que a informação fornecida pela divisão entre a corrente de sequência negativa pela de sequência positiva acarretou em ganhos para a medição do tipo não-fasorial e que, em alguns casos, até apresentaram resultados superiores às medições fasoriais.

4.3 DEFEITOS SIMULTÂNEOS

Este tipo de defeito é caracterizado pela abertura de um condutor energizado, com contato ao solo por algum dos dois lados da abertura. Sendo assim, este defeito atua desconectando as cargas localizadas à jusante, na mesma fase defeituosa e, ao mesmo tempo, gera correntes de defeito ao solo, com intensidades que variam de acordo com o lado de contato ao solo, o local onde o defeito ocorreu e a impedância do defeito. Com isso, observa-se que, neste tipo de defeito, podem ocorrer decréscimos ou acréscimos de correntes, ou até mesmo, as correntes se manterem no mesmo nível se comparadas à situações normais de funcionamento.

Para as simulações, foram utilizados os sistemas IEEE 13 barras e IEEE 34 barras para a verificação da influência da quantidade de medidores, bem como do tipo de medição utilizado nos resultados das RNAs desenvolvidas.

4.3.1 Simulações no sistema IEEE 13 barras

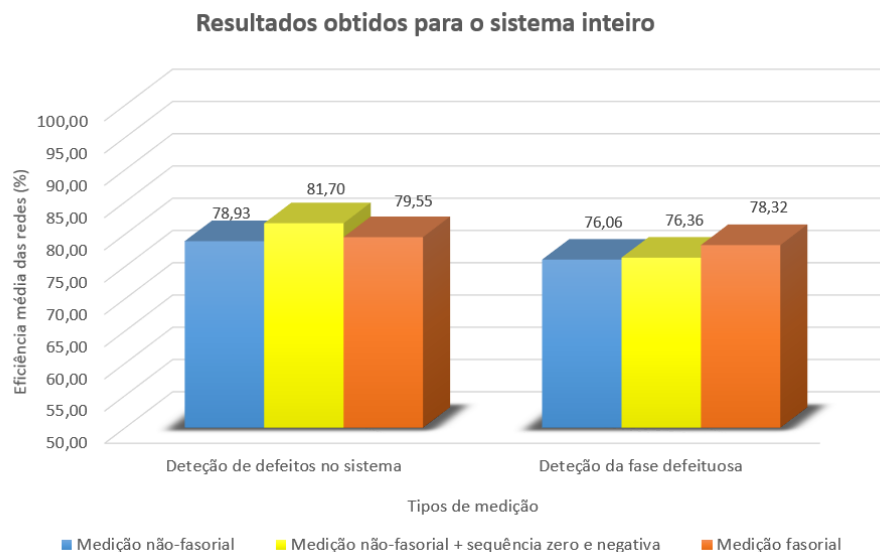
Para análise das influências em relação à quantidade de medidores e ao tipo de medição realizada no sistema IEEE 13 barras, utilizou-se variações de carregamento de 20% nas simulações. Além disso, as resistências de defeito foram consideradas entre 100 e 200 Ω . Os

tipos de medições utilizados como entradas das RNAs foram: medições não-fasoriais, medições não-fasoriais com acréscimo da divisão entre as correntes de sequência zero e negativa pela corrente de sequência positiva e medições fasoriais. O Gráfico 11 ilustra os resultados obtidos com a utilização de apenas um medidor no sistema, localizado na subestação.

Já o Gráfico 12 ilustra os resultados obtidos com dois medidores alocados no sistema, localizados na subestação e na linha 632-671.

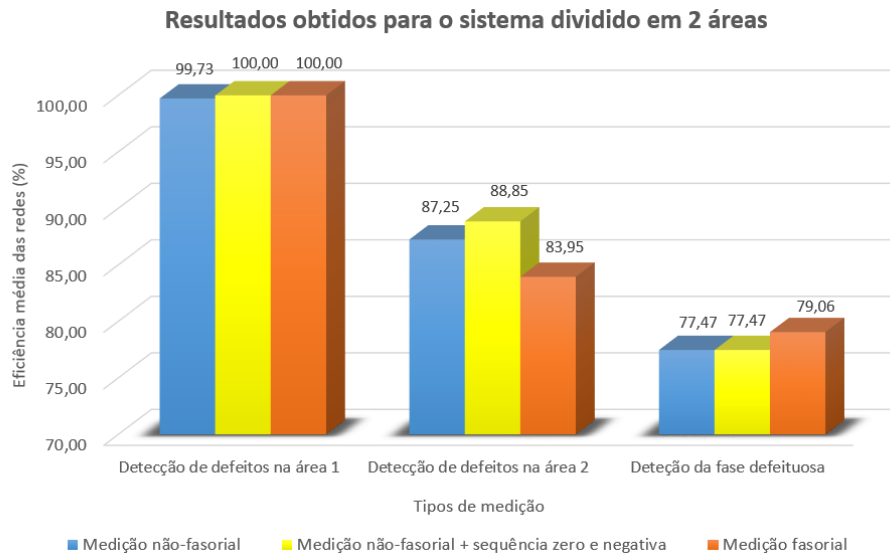
Finalmente, o Gráfico 13 ilustra os resultados obtidos com três medidores alocados no sistema, localizados na subestação, na linha 632-671 e na linha 671-684.

Gráfico 11 – Resultados obtidos para defeitos simultâneos no sistema IEEE 13 barras com apenas um medidor.



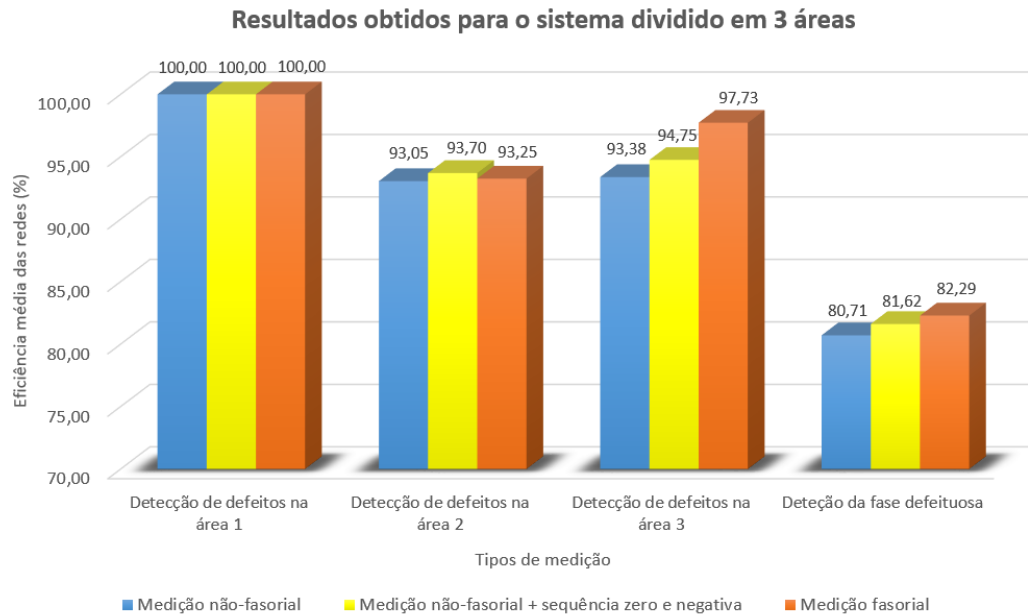
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 12 – Resultados obtidos para defeitos simultâneos no sistema IEEE 13 barras com dois medidores.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 13 – Resultados obtidos para defeitos simultâneos no sistema IEEE 13 barras com três medidores.



Fonte: Elaborado pelo autor.

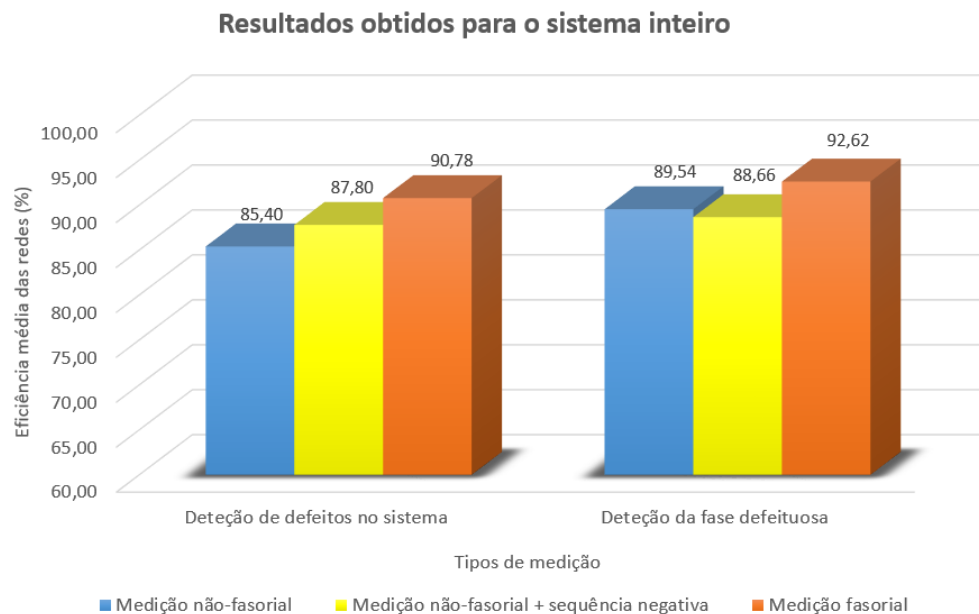
4.3.2 Simulações no sistema IEEE 34 barras

Para a realização da análise envolvendo o sistema IEEE 34 barras, utilizou-se variação de carregamento de 20% nas simulações. Além disso, as resistências de defeitos foram consideradas entre 500 e 800Ω. Os tipos de medições utilizados como entradas das RNAs foram os mesmos utilizados nas simulações com o sistemas IEEE 13 barras. O Gráfico 14 ilustra os resultados obtidos com a utilização de apenas um medidor no sistema, localizado na subestação de energia.

Já o Gráfico 15 ilustra os resultados obtidos com a utilização de dois medidores alocados no sistema, localizados na subestação e na linha 830-854.

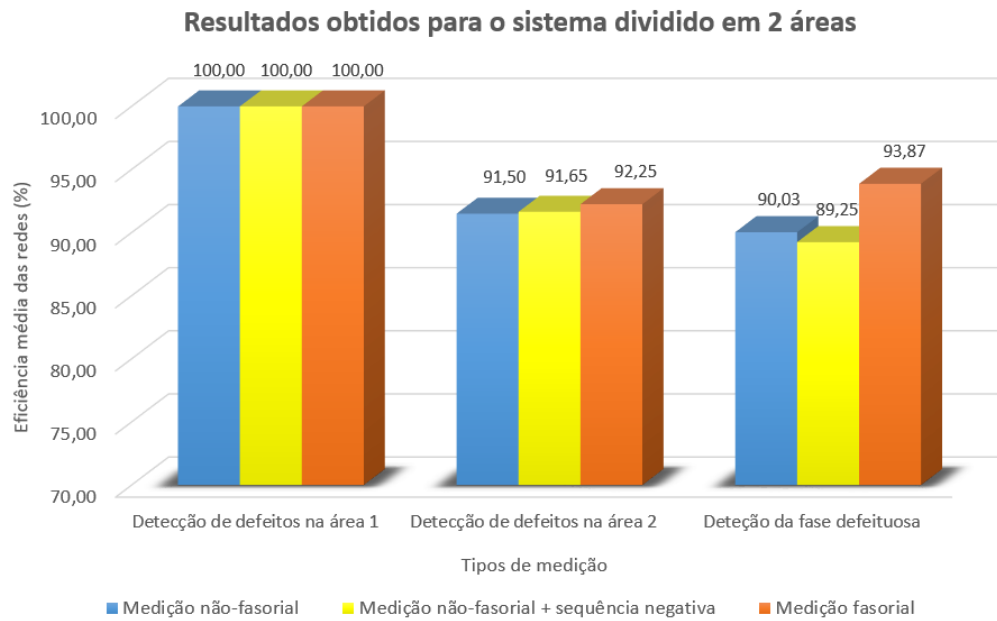
Da mesma forma, o Gráfico 16 ilustra os resultados obtidos com três medidores alocados no sistema, localizados na subestação, na linha 830-854 e na linha 834-860.

Gráfico 14 – Resultados obtidos para defeitos simultâneos no sistema IEEE 34 barras com apenas um medidor.



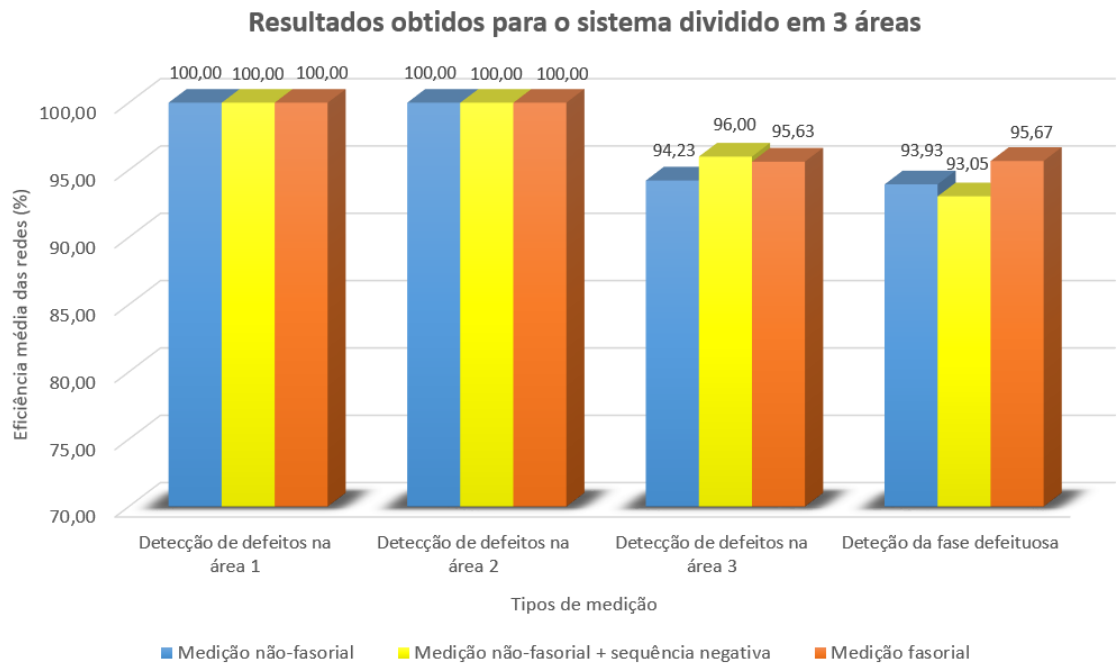
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 15 – Resultados obtidos para defeitos simultâneos no sistema IEEE 34 barras com dois medidores.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 16 – Resultados obtidos para defeitos simultâneos no sistema IEEE 34 barras com três medidores.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.3 Análise dos resultados obtidos

As simulações dos defeitos simultâneos nos sistemas IEEE 13 barras e IEEE 34 barras tiveram como principal objetivo a verificação do desempenho das RNAs definidas para a detecção e identificação desses defeitos. Conforme pode-se observar pelos resultados obtidos, os casos mais simples (com um medidor apenas) apresentaram desempenhos superiores a 85%. Porém, com o aumento da complexidade das simulações, os resultados foram superiores a 95%, garantindo boa eficiência do método proposto baseado na utilização das RNAs. Então, de acordo com os resultados obtidos, duas situações podem ser analisadas com relação ao processo de detecção de defeitos simultâneos nos sistemas de distribuição do IEEE:

- 1) O defeito simultâneo com contato ao solo pelo lado da carga possui características semelhantes aos defeitos de abertura comuns. Dessa forma, a presença de faltas no final dos ramais constitui o principal complicador para a detecção, uma vez que acarretam em baixo decréscimo de correntes.
- 2) O defeito simultâneo com contato ao solo pelo lado da geração é mais difícil de ser detectado quando as correntes observadas pelos medidores possuem o mesmo nível em relação à corrente de operação normal. Isso ocorre quando o decréscimo de corrente devido à carga que foi desconectada com a abertura do condutor é próxima à corrente de acrescida devido ao contato com o solo. Essa situação também é mais comum perto do fim dos ramais dos alimentadores, onde as altas impedâncias produzem baixo nível de corrente, porém próximo ao valor decrescido pela desconexão das cargas à jusante.

Sendo assim, uma alternativa para melhorar a detecção desse tipo de defeito, para ambas as análises anteriores, se dá através da alocação de mais medidores no sistema, próximos ao ramais terminais com as menores cargas alocadas à jusante. Através dos resultados das simulações realizadas foi possível notar a melhora na detecção de defeitos com esta proposta. Porém, os resultados obtidos com a utilização de mais do que três medidores começam a ser menos significativos, justificando-se, assim, o porquê de não terem sido mostrados.

Outro ponto importante a se analisar diz respeito ao tipo de medição adotado. Percebe-se que a medição fasorial mais uma vez é responsável por fornecer resultados muito melhores para as RNAs se comparadas às medições não-fasoriais. Para estes defeitos ainda analisou-se o desempenho das medições não-fasoriais com acréscimo das informações quanto às correntes de

sequência citadas. Observou-se que, essas correntes, melhoram significativamente os resultados se comparados aos de medições puramente não-fasoriais nas RNAs utilizadas para detecção dos defeitos. Em contrapartida, essas medições produzem um ligeiro decréscimo nos desempenhos das redes neurais utilizadas para identificação da fase sob defeito, provavelmente porque o acréscimo das informações das correntes de sequência não produzem efeito na análise das fases sob defeito.

5 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE DETECÇÃO DE DEFEITOS DE ABERTURA E SIMULTÂNEOS COM MEDIÇÕES DE TENSÃO EM BARRAS TERMINAIS

Este capítulo explica a formulação e quantifica por meio de testes a metodologia para detecção de defeitos de abertura e simultâneos com medições de tensão em barras terminais.

5.1 CONCEITUAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO (BLOCO D)

Uma alternativa para a detecção de defeitos que envolvem a quebra de condutores (defeitos de abertura e defeitos simultâneos) se dá através da análise das tensões terminais dos ramais de alimentadores em sistema de distribuição. Alguns trabalhos propõem a análise de desbalanços das tensões terminais para a detecção de defeitos, como Garcia-Santander *et al.* (2005) que propõe a observação de diferenças nas tensões pré-falta e pós-falta em barras terminais e Lau e Ho (2017) que propõe análise de diminuição nas tensões de fase e aumento da tensão de sequência zero para detecção dos defeitos de abertura. No entanto, não foi encontrado na literatura algum método que utilizasse RNAs para esta tarefa, conforme propõe-se nesta dissertação.

A análise das tensões em barras terminais é possível porque as tensões à jusante do ponto de defeito se reduzem drasticamente na mesma fase em que o defeito ocorreu. Este efeito é ainda mais notado quando o sistema não possui transformadores após o ponto de falta, como no caso do sistema IEEE 34 barras utilizado nos testes, em que as cargas são diretamente conectadas na média tensão.

A detecção dos defeitos através da análise de tensões terminais foi realizada por fase, ou seja, para defeitos em cada uma das três fases haviam redes neurais específicas para a detecção. Com a divisão do sistema por fases, as barras terminais foram previamente identificadas e supôs-se que medidores de tensão foram alocados. Um ponto importante a se ressaltar é que apenas medições do tipo não-fasorial foram adotadas nesta parte das simulações as quais envolvem medição de tensões em barras terminais.

Além disso, as linhas que compõem o sistema foram divididas em dois diferentes grupos: ramal principal e ramais laterais. Sendo assim, a detecção de defeitos ocorreu por áreas, sendo

que cada ramal lateral compôs uma área e cada partição do ramal principal, localizada entre dois ramais laterais, compôs também uma área. Para cada área, foi usada uma rede neural para detecção de defeitos internamente à mesma, sendo que:

- 1) As redes neurais responsáveis pela detecção de defeitos em ramais laterais receberam como entrada as medições de tensões do medidor alocado no fim do ramal lateral e do medidor alocado na barra final do ramal principal do sistema, isto é, na barra 840.
- 2) As redes neurais responsáveis pela detecção de defeitos em áreas compostas por partições do alimentador principal receberam como entrada as medições de tensões de todos os medidores alocados no sistema, na mesma fase sob análise.

Então, para as simulações, foram utilizadas duas bases de dados com 5000 casos armazenados em cada. A primeira base continha apenas casos com defeitos de abertura, com variações de carregamento de 40%, ou seja, em cada caso simulado, cada carga do sistema foi multiplicada por um valor aleatório entre 0,80 e 1,20. A segunda base de dados continha apenas casos com defeitos simultâneos (realizando contato com o solo por qualquer um dos lados), com variações de carregamento de 40% e impedância de defeito variando entre 500 e 800Ω.

Do total de casos armazenados em cada base, utilizou-se uma proporção de 80% para 20% em amostras de treinamento e testes, respectivamente. Todas as redes neurais responsáveis pela detecção do mesmo tipo de defeito foram treinadas e testadas com os 5000 casos armazenados na respectiva base de dados. No entanto, cada RNA deveria indicar defeitos que ocorressem dentro de determinada área e para determinada fase do sistema IEEE 34 barras. A Tabela 25 resume a divisão em áreas para cada fase e indica a posição dos medidores de tensão.

Tabela 25 – Resumo da divisão em áreas por fase do sistema IEEE 34 barras.

| Fase | Número de áreas | Medidores | |
|------|-----------------|------------|------------------------------------|
| | | Quantidade | Posições (barras) |
| A | 11 | 6 | 840, 862, 848, 864, 890 e 822 |
| B | 13 | 7 | 840, 838, 848, 890, 856, 826 e 810 |
| C | 7 | 4 | 840, 862, 848 e 890 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, é possível resumir que o sistema IEEE 34 barras foi dividido em 11 áreas para a detecção de defeitos na fase A, 13 áreas para a fase B e 7 áreas para a fase C. Essa consideração é válida para as análises envolvendo ambas as bases de dados. Para cada base, os resultados aferidos quanto aos acertos das RNAs internas à cada área foram calculados e apresentados.

5.2 CARACTERÍSTICAS DAS REDES NEURAIS INTRODUZIDAS

A Tabela 26 mostra algumas das principais características internas que são comuns a todas as RNAs utilizadas nas simulações envolvendo medições de tensão em barras terminais. Essas características foram definidas de acordo com alguns testes previamente realizados no sistema.

Tabela 26 – Informações gerais sobre as redes neurais definidas nos métodos de detecção com medição de correntes.

| Característica | Discriminação |
|----------------------------------|------------------------------------|
| Tipo de rede | <i>Feedforward backpropagation</i> |
| Algoritmo de treinamento | <i>Scaled conjugate gradient</i> |
| Quantidade de camadas ocultas | 1 |
| Função de ativação dos neurônios | Tangente sigmoide |

Fonte: Elaborado pelo autor.

A quantidade de neurônios na camada oculta varia entre as RNAs dependendo do tipo de ramal que está sendo protegido pela mesma, conforme pode-se observar na Tabela 27.

Tabela 27 – Quantidade de neurônios na camada oculta das RNAs de detecção de defeitos com medições de tensão.

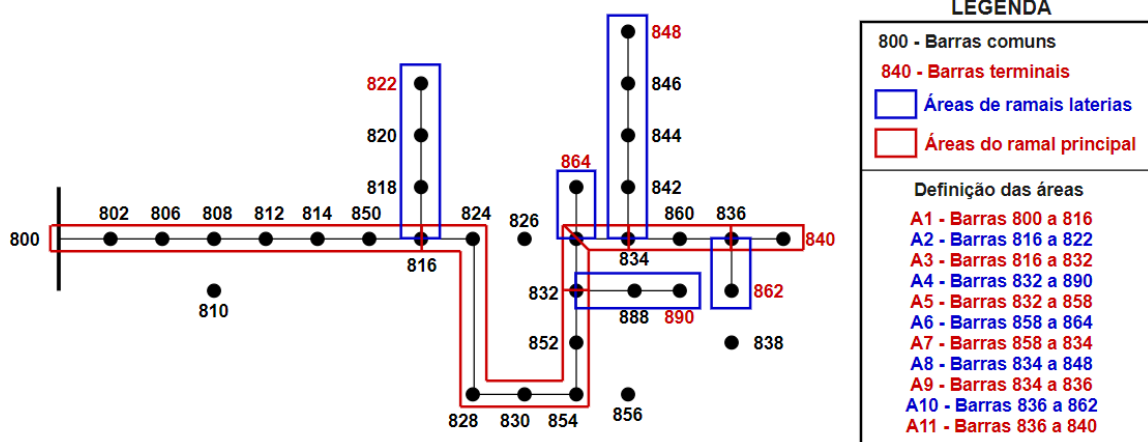
| Tipo de defeito | Tipo de ramal analisado pela RNA | Neurônios na camada oculta |
|--|---|-----------------------------------|
| Defeitos de abertura e simultâneos (medição de tensão) | Principal | 10 |
| | Lateral | 3 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 DETECÇÃO DE DEFEITOS NA FASE A DO SISTEMA IEEE 34 BARRAS

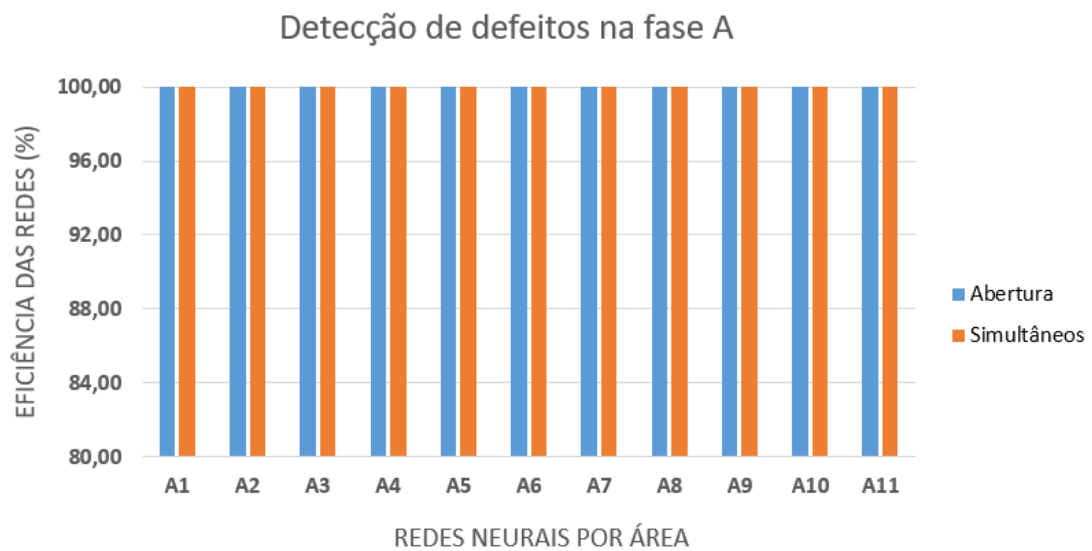
Pode-se observar na Figura 5, a divisão em áreas na fase A do sistema IEEE 34 barras. Por conseguinte, os resultados obtidos pelas RNAs de cada área pode ser verificado no Gráfico 17.

Figura 5 – Divisão em áreas na fase A do sistema IEEE 34 barras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 17 – Resultados obtidos para a detecção de defeitos na fase A.

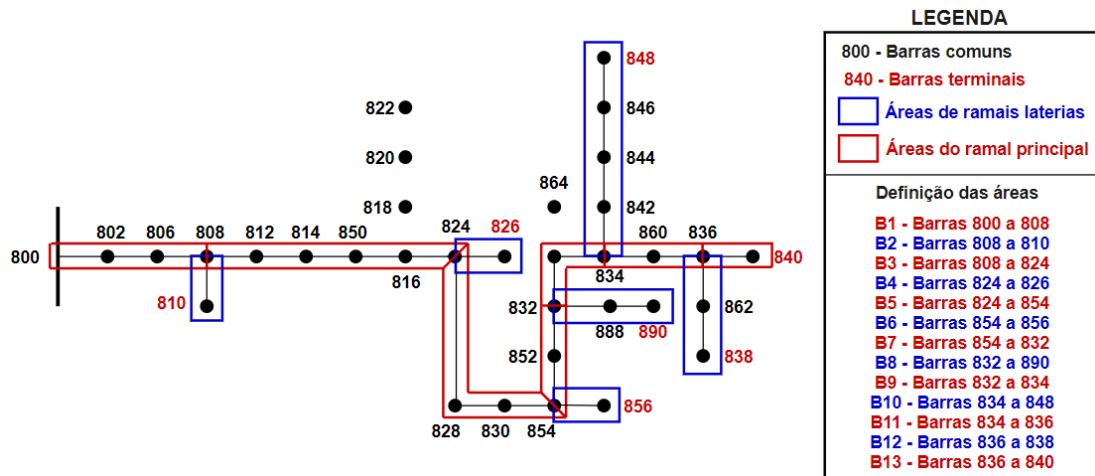


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4 DETECÇÃO DE DEFEITOS NA FASE B DO SISTEMA IEEE 34 BARRAS

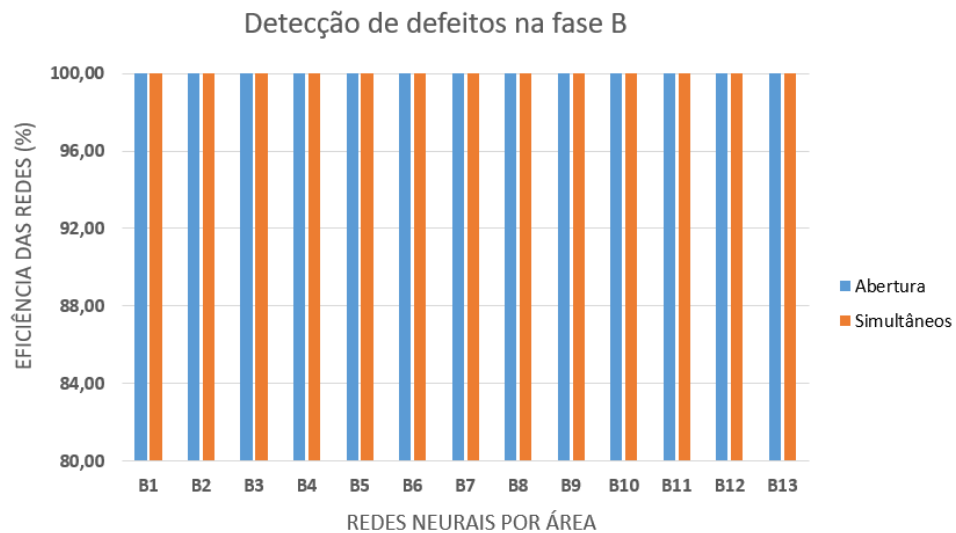
A divisão em áreas na fase B do sistema IEEE 34 barras pode ser observada na Figura 6. Por conseguinte, os resultados obtidos pelas redes neurais de cada área pode ser verificado no Gráfico 18.

Figura 6 – Divisão em áreas na fase B do sistema IEEE 34 barras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 18 – Resultados obtidos para a detecção de defeitos na fase B.

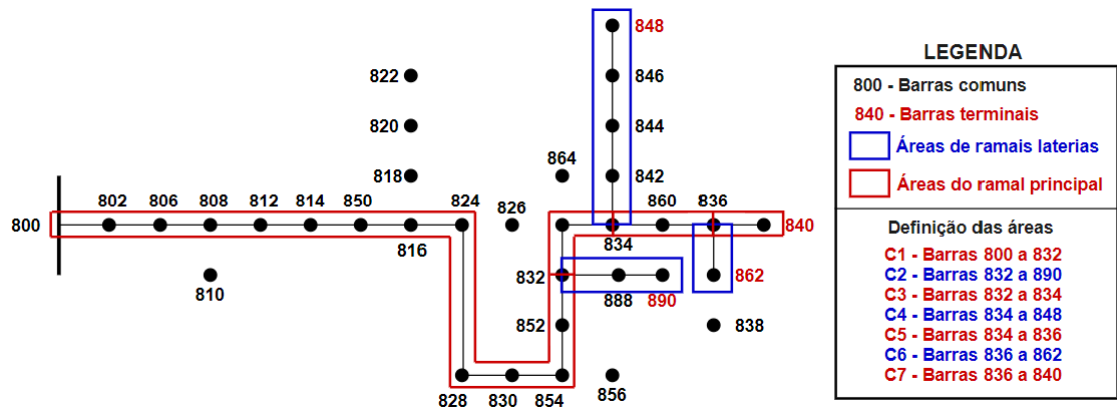


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5 DETECÇÃO DE DEFEITOS NA FASE C DO SISTEMA IEEE 34 BARRAS

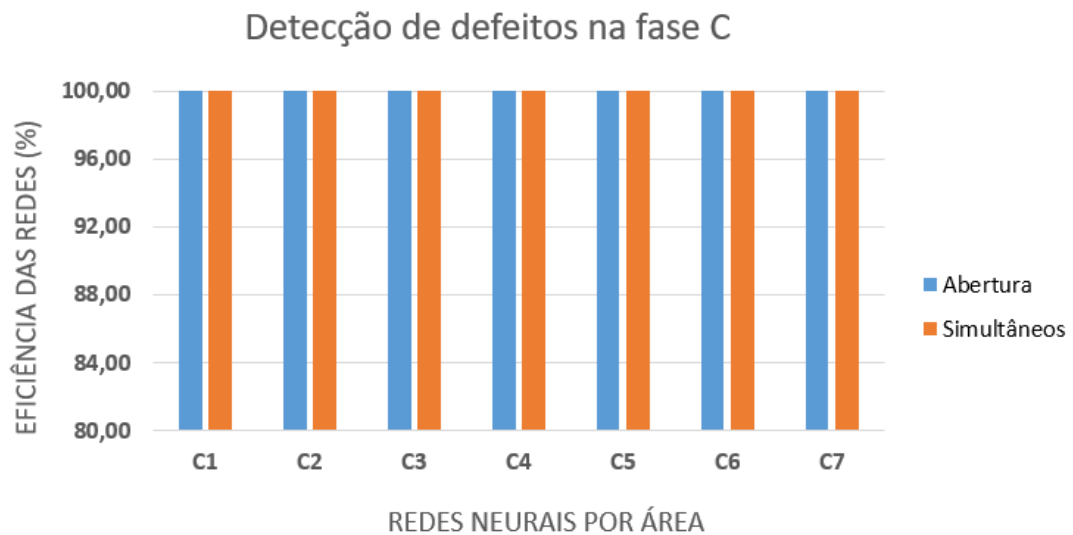
A divisão em áreas na fase C do sistema IEEE 34 barras pode ser observada na Figura 7. Por conseguinte, os resultados obtidos pelas RNAs de cada área pode ser verificado no Gráfico 19.

Figura 7 – Divisão em áreas na fase C do sistema IEEE 34 barras.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 19 – Resultados obtidos para a detecção de defeitos na fase C.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Conclui-se, então, que as simulações envolvendo medições de tensão nas barras terminais dos sistemas de distribuição apresentaram resultado de 100% para todas as áreas na detecção de ambos os defeitos. É possível detectar com perfeição, através de áreas, a localização dos defeitos que envolvem a quebra de condutores, isto é, os defeitos de abertura e os defeitos simultâneos. No entanto, é necessário entender que o principal custo a se pagar com esse método diz respeito à alta quantidade de medidores que deverão ser alocados no sistema.

5.7 CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMENTO

Em muitos sistemas de distribuição reais, alguns dos ramais laterais disponíveis, muitas vezes, não requerem uma atenção muito grande por parte da concessionária de energia, não justificando um investimento para detecção de defeitos. Isso ocorre muitas vezes em ramais de alimentadores para entrega de energia em zonas rurais ou em casos em que o número de consumidores alimentados pelo ramal não é tão expressivo. Dessa forma, cabe ressaltar que o método funciona com a desconsideração de algum ou de vários ramais laterais não importantes, com boa eficiência. O principal inconveniente é que as áreas do alimentador principal que estão mais próximas ao ramal lateral desconectado se unirão em uma área apenas e, conseqüentemente, ocorrerá uma diminuição da precisão de localização do defeito.

Outra consideração com relação ao método proposto diz respeito à possíveis defeitos nos medidores de tensão utilizados no final dos ramais. Alguns testes foram realizados possibilitando duas principais conclusões:

- 1) Defeitos em medidores localizados no fim de ramais laterais prejudicam basicamente a detecção de defeitos na área que engloba o próprio ramal lateral e nas duas áreas adjacentes a esse ramal que compõem o ramal do alimentador principal.
- 2) Defeito no medidor do final do ramal principal prejudica a detecção de várias áreas do sistema aleatoriamente. Sendo assim, para o método proposto, sugere-se que medidores com níveis de confiabilidade mais altos sejam utilizados para o final do alimentador principal do sistema.

6 SIMULAÇÕES NO RTDS

Neste capítulo apresenta-se o desenvolvimento realizado para a criação, o treinamento e a utilização de redes neurais para simulações em tempo real. O objetivo principal deste processo consistiu na verificação do funcionamento das RNAs na detecção de defeitos em um sistema de distribuição, porém trabalhando em tempo real. Salienta-se que, para o processo, as RNAs são previamente treinadas e armazenadas no dispositivo de *hardware*, para posterior funcionamento em tempo real.

6.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Os dois principais equipamentos utilizados para a simulação em tempo real são o RTDS (*Real Time Digital Simulator*) e a MicroAutoBox (ou dSPACE).

A Figura 8 mostra dois *racks* de RTDS, pertencentes ao Laboratório de Simulações Multiplataformas (LABSIM) da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF).

Figura 8 – *Racks* RTDS do LABSIM.



Fonte: Fotografia do RTDS do LABSIM retirada pelo autor.

O RTDS é um dispositivo de simulação de sistemas de energia capaz de trabalhar em tempo real, com passos de simulação iguais ou menores do que $50\mu\text{s}$. Este equipamento possui uma interface com o usuário através do *software* RSCAD onde as simulações são elaboradas e executadas (ARCHETTI, 2019).

O *software* RSCAD possui dois principais ambientes de simulações:

- 1) O *Draft* onde as simulações são construídas a partir de diagrama de blocos. Neste módulo o usuário deve descrever todas as conexões entre os equipamentos utilizados, bem como construir sua lógica de operação.
- 2) O *RunTime* onde a simulação é executada e os dados desejados são acompanhados em tempo real. Além disso, é possível executar ações na simulação, também em tempo real, desde que sejam pré-programadas no módulo *Draft*. Normalmente, essas ações são executadas por meio de botões e chaves no próprio módulo *RunTime*.

Além disso, é possível trabalhar com saídas e entradas de dados comunicadas a outros dispositivos desejáveis, como relés ou dispositivos de controle e automação. Neste trabalho, a comunicação é realizada com o dispositivo dSPACE. A Figura 9 mostra o dispositivo dSPACE do Laboratório de Simulações Multiplataformas (LABSIM) da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF).

Figura 9 – Dispositivo MicroAutoBox ou dSPACE do LABSIM.



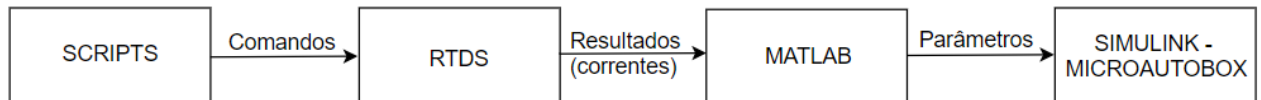
Fonte: Fotografia do dSPACE do LABSIM retirada pelo autor.

O MicroAutoBox é um dispositivo robusto e compacto para prototipagem de sistemas, capaz de trabalhar em tempo real sem intervenção do usuário. Pode ser usado para diversos tipos de simulações em diversas áreas da engenharia. Neste trabalho, especificamente, o MicroAutoBox é utilizado para construção de RNAs através de uma interface com o Simulink.

6.2 TREINAMENTO DAS REDES NEURAIAS

Nesta seção discute-se o processo de aquisição de dados, via execuções no RTDS, para treinamento das RNAs utilizadas para a detecção e a identificação de defeitos. O Esquema 10 resume o processo de aquisição dos dados para treinamento e construção das RNAs.

Esquema 10 – Processo de aquisição de dados para treinamento das RNAs.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para treinamento das RNAs, necessita-se de uma quantidade de casos armazenados em uma base de dados. Como casos, considera-se pontos operativos do sistema de distribuição utilizado (IEEE 13 barras sem regulador de tensão). Para tornar as simulações mais condizentes com a realidade foram simulados casos com e sem defeitos no sistema e com diferentes variações de carregamento. Assim, para cada tipo de defeito estudado neste trabalho (FAIs, abertura e simultâneos), foram simulados 1000 casos para compor cada base de dados. Nesta tarefa, tornou-se mais viável a gravação e a utilização do recurso de *scripts* do *software* RSCAD, responsável por gerar as simulações no RTDS, sem a necessidade de comandos externos por meio do usuário.

Os *scripts* normalmente são escritos por linhas de comando manualmente. Porém, devido a grande quantidade de casos simulados em cada base de dados, optou-se por gerar os dados de variação de carregamento bem como, localização (linha e fase) e impedância (para os casos com defeitos em derivação ou simultâneos) de forma aleatória, pelo Matlab e, posteriormente, transcrevê-los para o arquivo dos *scripts*.

Para a simulação de todos os tipos de defeitos, optou-se por utilizar as variações de carregamento em apenas algumas cargas estratégicas do sistema IEEE 13 barras sem regulador de tensão, sendo que essas cargas estão definidas na Tabela 28, por séries com distribuição normal.

A variação de carregamento na barra 675 é menor que a variação das demais barras selecionadas porque a potência nominal desta carga é muito superior as demais, gerando variações muito grandes mesmo com fatores multiplicadores mais baixos.

Tabela 28 – Limites de variações nos carregamentos em barras do sistema IEEE 13 barras.

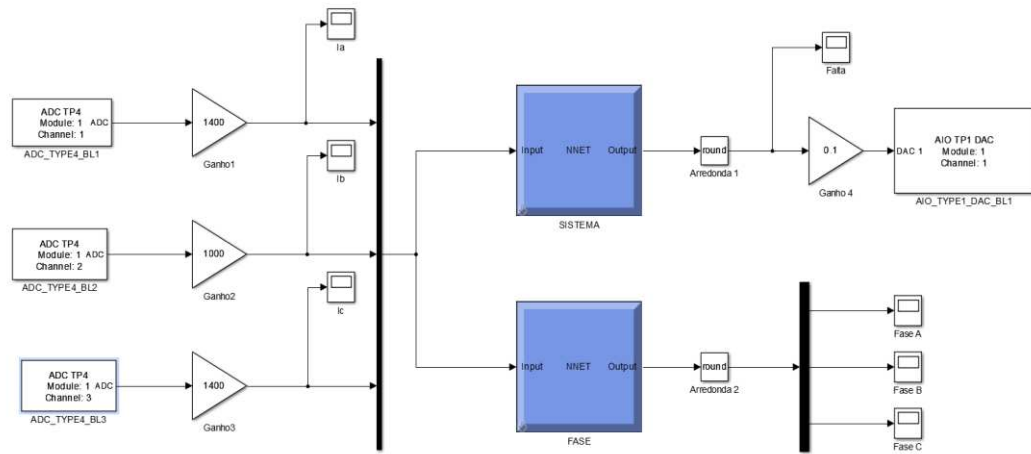
| Carga | Características | Multiplicador | Multiplicador |
|-----------|--------------------------|---------------|---------------|
| | | mínimo | máximo |
| Barra 646 | Monofásica (fase B) | 0,85 | 1,15 |
| Barra 611 | Monofásica (fase C) | 0,85 | 1,15 |
| Barra 652 | Monofásica (fase A) | 0,85 | 1,15 |
| Barra 675 | Trifásica desequilibrada | 0,95 | 1,05 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a criação do arquivo de *scripts*, o próprio *software* RSCAD trabalha alternando entre os casos simulados, ajustando a localização das faltas e as variações de carregamento e, salvando-se os resultados desejados. Neste caso, os resultados salvos são os módulos das correntes na subestação do sistema IEEE 13 barras. Os resultados de correntes salvos, por sua vez, são utilizados para treinar as redes neurais de detecção e identificação de defeitos, respectivamente. Após a criação e o treinamento das redes, estas são exportadas, com todos os parâmetros internos já definidos (pesos, bias e funções de ativação) para o ambiente Simulink do Matlab.

Um exemplo das RNAs construídas no ambiente Simulink pode ser observado na Figura 10. As redes estão representadas pelos blocos em azul.

Figura 10 – Disposição das RNAs no Simulink.



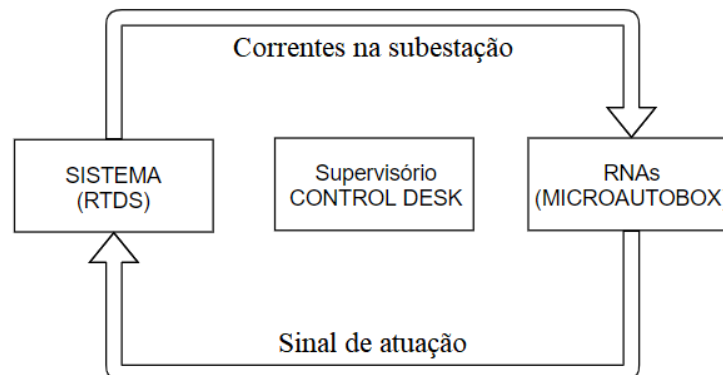
Fonte: Captura de tela do *software* Matlab.

Por fim, realiza-se a conexão do Simulink com o MicroAutoBox para criação física das redes neurais, ou seja, o MicroAutoBox funciona como um *hardware* para as RNAs. Assim, as RNAs ficam disponíveis para funcionamento em tempo real.

6.3 SIMULAÇÕES EM TEMPO REAL

O funcionamento em tempo real do sistema é mostrado no Esquema 11.

Esquema 11 – Funcionamento dos equipamentos em tempo real.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme indica o Esquema 11, o sistema IEEE 13 barras, disponível no RTDS, fornece os módulos das correntes medidas na subestação para o MicroAutoBox, onde estão armazenadas

as RNAs. Quando o sistema é perturbado com variações no carregamento, faltas ou ambos os eventos, as RNAs recebem os valores atualizados das correntes aferidas, em escala de tempo real. Com isso, a função das redes, é separar corretamente os casos com falta e indicar a fase em que o defeito ocorreu. Paralelamente, o supervisorio ControlDesk permite analisar instantaneamente qualquer variável definida no Simulink.

6.4 COMUNICAÇÃO ENTRE OS EQUIPAMENTOS

Para estabelecer a comunicação entre os equipamentos utilizados neste projeto de funcionamento em tempo real é necessário uma correta especificação de parâmetros divisores e multiplicadores de entrada e saída nos equipamentos utilizados, para que não ocorra perda de informações relacionadas a saturação dos sinais ou outras causas.

Sendo assim, ressalta-se que o dSPACE possui limitação das entradas físicas referentes aos sinais de comunicação. A comunicação é realizada através de sinais de tensão que podem variar de -10V a 10V. Sendo assim, para manter uma margem de segurança optou-se que o pico dos valores de comunicação fossem de no máximo 5V. Para isso, é necessário observar-se a máxima corrente medida na subestação do sistema trabalhado sob qualquer condição de funcionamento. Então, algum valor igual ou superior deve ser configurado no RSCAD para realizar a divisão do valor real de corrente pelo valor estabelecido. Cabe ressaltar que o *software* RSCAD automaticamente multiplica o valor de saída por 5V.

Para facilitar o entendimento desse procedimento definiu-se como I_{REAL} o valor real da corrente que está sendo aferida na subestação do sistema e como I_{MAX} um valor igual ou superior ao máximo valor de corrente que se pode obter nas simulações. Com isso, a Equação (10) define a operação realizada na saída do RTDS para comunicação com o dSPACE, onde obtém-se o valor que realmente está sendo enviado, definido como I_{COM} .

$$I_{COM} = \frac{I_{REAL} \times 5V}{I_{MAX}} \quad (10)$$

Posteriormente, após a transferência do sinal da saída do RTDS para a entrada do dSPACE, o mesmo sinal, definido como I_{COM} , é automaticamente dividido por 10. Sendo assim, a corrente de entrada no dSPACE, definida como I_{ENT} , pode ser representada conforme indica a Equação (11).

$$I_{ENT} = \frac{I_{COM}}{10} = \frac{I_{REAL}}{2 \times I_{MAX}} \quad (11)$$

Assim, para que se trabalhe com o valor original medido na subestação do sistema no RTDS, rearranja-se a Equação (11), de forma a obter-se I_{REAL} a partir de cálculos envolvendo-se a entrada I_{ENT} disponível na entrada do dSPACE. A Equação (12) mostra a relação entre os parâmetros.

$$I_{REAL} = (2 \times I_{MAX}) \times I_{ENT} \quad (12)$$

A partir dos resultados mostrados na Equação (12) nota-se que, para obter o valor original da corrente aferida na subestação, basta inserir um bloco de ganho no Simulink (interfaciado com o dSPACE) igual ao dobro do valor de I_{MAX} . Como o valor de I_{MAX} é definido pelo usuário, torna-se simples selecionar o valor ganho necessário. Dessa maneira, as simulações ocorrem com os valores originais e sem nenhum tipo de erro.

6.5 CASO 1 – DEFEITOS EM DERIVAÇÃO

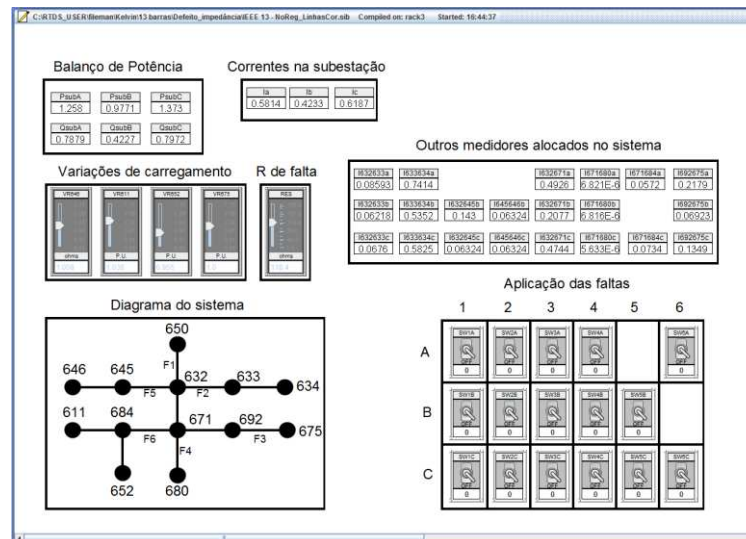
Para as simulações voltadas à análise dos defeitos em derivação, definiu-se, previamente, possíveis locais onde a falta poderia ocorrer. Adotou-se essa estratégia porque para a aplicação das faltas torna-se necessário a preparação dos possíveis locais, que são atividades demasiadamente trabalhosas para este tipo de simulação. Por isso, definiu-se locais estratégicos onde as faltas poderiam ocorrer, vide Tabela 29.

Tabela 29 – Possíveis locais para ocorrência das faltas de alta impedância.

| Modelo | Linha | Fases |
|---------|---------|-------|
| FALTA 1 | 650-632 | A-B-C |
| FALTA 2 | 632-633 | A-B-C |
| FALTA 3 | 692-675 | A-B-C |
| FALTA 4 | 671-680 | A-B-C |
| FALTA 5 | 632-645 | B-C |
| FALTA 6 | 671-684 | A-C |

Fonte: Elaborado pelo autor.

O *software* RSCAD fornece um supervisor para análise de dados, denominado *RunTime*. Este supervisor pode ser utilizado para realizar as variações de carregamento, a aplicação das faltas e mudança na impedância de falta, por exemplo. Além disso, pode-se observar dados do sistema em tempo real, como os módulos das correntes da subestação e das linhas do sistema. A Figura 11 ilustra o supervisor *RunTime* do RSCAD na aplicação dos defeitos de contato.

Figura 11 – Supervisor *RunTime* do RSCAD para faltas de alta impedância.

Fonte: Captura de tela do *software* RSCAD.

6.6 CASO 2 – DEFEITOS DE ABERTURA

Da mesma forma que na seção anterior definiu-se algumas posições estratégicas para aplicação dos defeitos de abertura. A Fabela 30 mostra as posições previamente definidas.

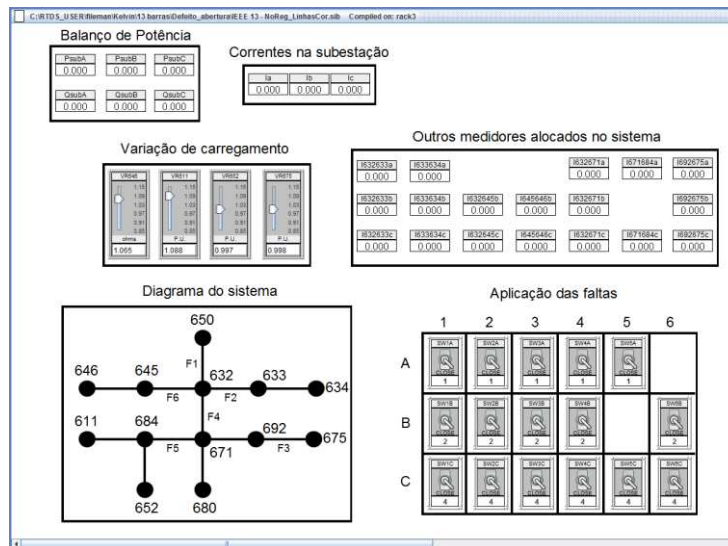
Fabela 30 – Possíveis locais para ocorrência das faltas de abertura.

| Modelo | Linha | Fases |
|---------|---------|-------|
| FALTA 1 | 650-632 | A-B-C |
| FALTA 2 | 632-633 | A-B-C |
| FALTA 3 | 692-675 | A-B-C |
| FALTA 4 | 632-671 | A-B-C |
| FALTA 5 | 671-684 | A-C |
| FALTA 6 | 632-645 | B-C |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Da mesma forma, a Figura 12 ilustra o supervisor *RunTime* do RSCAD.

Figura 12 – Supervisor *RunTime* do RSCAD para defeitos de abertura.



Fonte: Captura de tela do *software* RSCAD.

6.7 CASO 3 – DEFEITOS SIMULTÂNEOS

Da mesma forma que nas seções anteriores, definiu-se algumas posições estratégicas para aplicação dos defeitos simultâneos. A Tabela 31 mostra estas posições previamente definidas.

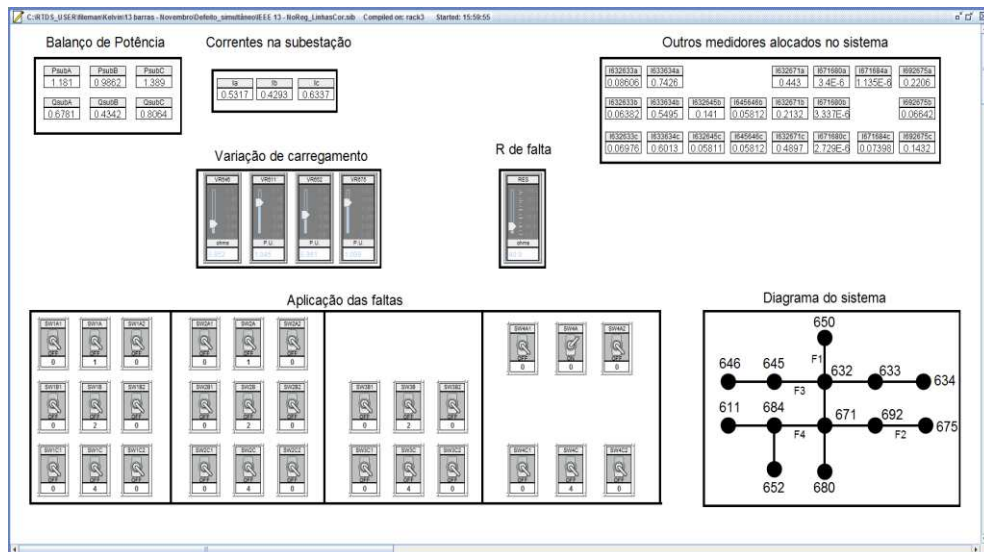
Tabela 31 – Possíveis locais para ocorrência dos defeitos simultâneos.

| Modelo | Linha | Fases |
|---------|---------|-------|
| FALTA 1 | 650-632 | A-B-C |
| FALTA 2 | 692-675 | A-B-C |
| FALTA 3 | 632-645 | B-C |
| FALTA 4 | 671-684 | A-C |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Também, da mesma forma que na seção anterior, a Figura 13 ilustra o supervisório *RunTime* do RSCAD.

Figura 13 – Supervisório *RunTime* do RSCAD para defeitos simultâneos.



Fonte: Captura de tela do *software* RSCAD.

6.8 REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS UTILIZADAS

Para a realização das simulações em tempo real, foi utilizada a mesma estrutura de redes neurais para as simulações dos três tipos de defeitos já discutidos neste trabalho. Algumas das principais características dessas redes estão disponibilizadas na Tabela 32.

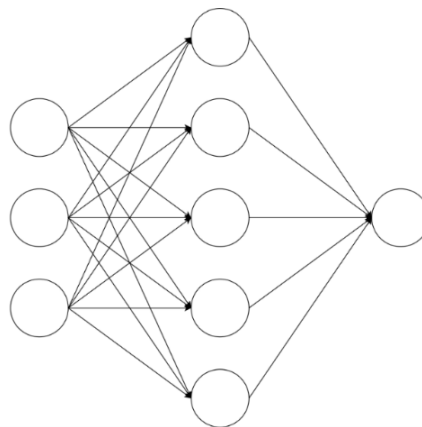
As arquiteturas utilizadas na construção das redes neurais utilizadas para detecção e identificação de defeitos estão mostradas, respectivamente, na Figura 14 e na Figura 15.

Tabela 32 – Informações sobre as redes neurais utilizadas nas simulações em tempo real.

| Característica | Discriminação |
|--------------------------------------|----------------------------|
| Tipo de rede | Feedfoward backpropagation |
| Algoritmo de treinamento | Scaled conjugate gradient |
| Quantidade de camadas ocultas | 1 |
| Número de neurônios na camada oculta | 5 |
| Função de ativação dos neurônios | Tangente sigmoide |

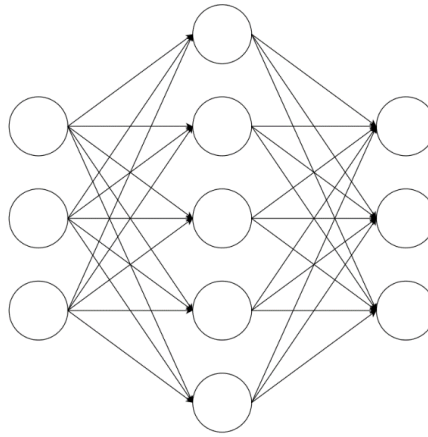
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 14 – Arquitetura das redes neurais utilizadas para a detecção de defeitos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15 – Arquitetura das redes neurais utilizadas para a identificação de defeitos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.9 RESULTADOS

No processo de treinamento das redes neurais foram geradas bases de dados com 1000 casos armazenados, para cada tipo de defeito. Esses casos representam 1000 diferentes pontos operativos do sistema IEEE 13 barras, com presença ou ausência de defeito em cada caso. Da mesma forma, para a quantificação dos resultados, foram gerados outros 200 casos diferentes. O objetivo de quantificar os resultados é garantir a qualidade da comunicação e o funcionamento das redes neurais, com atuação em tempo real. A Tabela 33 mostra os resultados obtidos para os testes de operação das redes neurais em tempo real.

Tabela 33 – Resultados dos testes em tempo real.

| Simulação | Impedância de defeitos | Resultados (%) | |
|------------|------------------------|-----------------------|---------------------------|
| | | Deteccção de defeitos | Identificação de defeitos |
| FAIs | 100Ω a 200Ω | 93,0 | 100 |
| | 60Ω a 150Ω | 100 | 100 |
| Abertura | - | 97,0 | 100 |
| Simultâneo | 100 Ω a 200Ω | 97,5 | 100 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

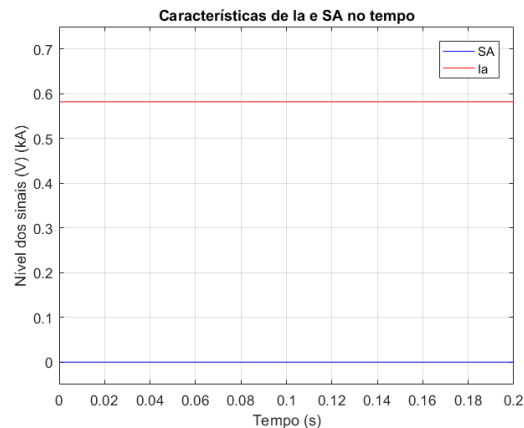
6.10 TEMPO DE ATUAÇÃO DAS REDES NEURAIIS

Uma importante análise a se realizar com relação às simulações em tempo real, diz respeito ao cálculo do tempo de atuação das redes neurais na detecção dos defeitos. Para isso, utilizou-se o sinal de atuação (denominado SA) que deixa o dSPACE e volta para o sistema IEEE 13 barras no RTDS. Este sinal representa a saída da rede neural de detecção de defeitos, isto é, traz a informação da ocorrência ou não de defeitos pela RNA. Dessa forma, considera-se que esse sinal possui valor 0V quando não há defeito e valor 0,5V quando há defeito.

Para o cálculo dos tempos envolvidos na atuação da rede neural, utilizou-se a rede para detecção de defeitos de alta impedância, com aplicação de um curto-circuito na fase A do sistema, entre as linhas 650 e 632 com impedância igual a 120 Ω . Para os demais tipos de defeitos e para outras posições das faltas nos sistema, os tempos correspondentes para atuação das redes neurais é bastante semelhante, garantindo-se a generalização pelo exemplo proposto.

Então, a Figura 16 mostra o sinal de atuação e a corrente da fase A da subestação do sistema (em valor rms), operando normalmente, sem curto-circuito.

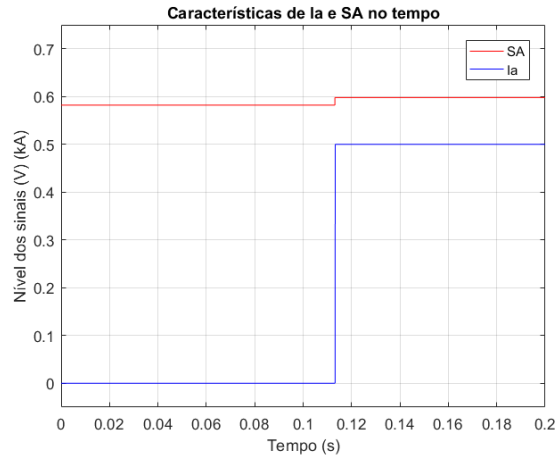
Figura 16 – Característica do sinal de atuação e da corrente na fase A em situação de operação normal.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se perceber que a corrente de operação normal é de aproximadamente 582 A. Dessa forma, a rede neural indica a ausência de curto-circuito e, portanto, o sinal de atuação está em 0V. Então, com a aplicação do curto-circuito citado anteriormente, variações nas curvas do sinal de atuação e da corrente da fase A na subestação são observadas. A Figura 17 mostra a variação sofrida pelos sinais.

Figura 17 – Mudanças nas curvas do sinal de atuação e da corrente na fase A.

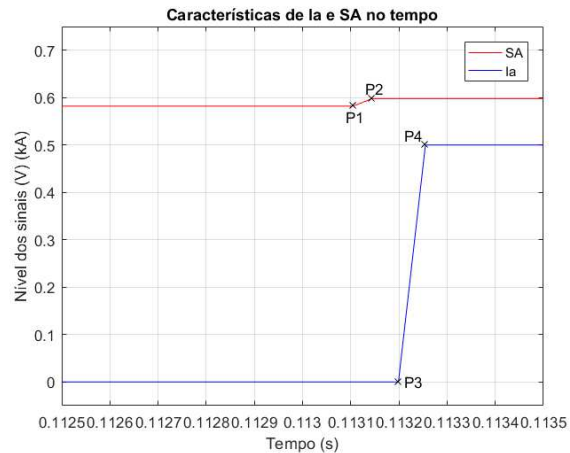


Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se perceber que, após a aplicação do curto-circuito na fase A, a corrente da mesma fase cresceu, como era de se esperar, para aproximadamente 598 A. A rede neural responsável pela detecção de defeitos no sistema identificou o defeito e mudou o nível do sinal de atuação para 0,5V, também conforme o esperado.

No entanto, não foi possível observar com clareza os tempos de atuação da rede neural. Dessa forma, a Figura 18 mostra a característica do sinal de atuação e da corrente na fase A, com uma aproximação maior, para melhor observação da escala de tempo.

Figura 18 – Aproximação nas curvas do sinal de atuação e da corrente na fase A.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 34 mostra a especificação quanto aos pontos amostrados na Figura 18, para maior clareza das informações. Observa-se que os tempos aferidos são relativos ao momento da simulação sob análise, configurando valores absolutos. No entanto, deseja-se observar a diferença entre os tempos de ocorrência dos eventos, configurando intervalos de tempo.

Tabela 34 – Especificação dos pontos amostrados relacionados a atuação da rede neural.

| Ponto | Especificação | Tempo (s) | Nível do sinal |
|--------------|--------------------------------------|------------------|-----------------------|
| P1 | Início do defeito | 0,113105 | 0,582 kA |
| P2 | Estabilização da corrente de defeito | 0,113144 | 0,598 kA |
| P3 | Resposta da RNA para o defeito | 0,113199 | 0V |
| P4 | Fim da transmissão do SA | 0,113255 | 0,5V |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que o tempo total de processamento da rede, ou seja, o intervalo entre o momento em que começa o curto-circuito até que a informação fornecida pela rede seja completamente transferida ao sistema, é igual a 0,15 ms. Este tempo é significativamente baixo. Comprova-se, portanto, que a utilização das RNAs para detecção de defeitos pode ser realizada de forma rápida e precisa.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, apresentam-se as principais conclusões deste trabalho além de algumas possibilidades de trabalhos futuros.

7.1 CONCLUSÕES

Este trabalho foi realizado como uma contribuição para a área de detecção de faltas em sistemas de distribuição utilizando-se redes neurais artificiais. Considera-se que os avanços tecnológicos na área da inteligência artificial observado nas últimas décadas contribuíram significativamente nos mais diversos ramos do conhecimento. Sendo assim, justifica-se a utilização das RNAs na detecção de defeitos, constituindo uma área muito promissora para pesquisas.

No primeiro capítulo, a problemática voltada à detecção de defeitos foi introduzida, bem como as principais motivações para a realização deste trabalho. Ainda no primeiro capítulo, foi realizada a revisão bibliográfica a respeito dos principais tipos de defeitos que podem ocorrer nos sistemas de distribuição.

No segundo capítulo, foi realizado um estudo sobre os tipos de defeitos tratados neste trabalho, levando-se em consideração um sistema teste. Através de simulações neste sistema, foi possível observar algumas das principais características de cada defeito, para que as RNAs fossem utilizadas para detecção e identificação desses defeitos de acordo com as características notadas.

No terceiro capítulo foi mostrada a construção das simulações computacionais envolvendo medições de corrente. Para isso, foi utilizada uma interface entre os *softwares* Matlab e OpenDSS. Para essa forma de detecção foram utilizados três blocos de simulações e cada um foi devidamente explicado com o auxílio de fluxogramas. O primeiro bloco é responsável pela criação das bases de dados para treinamento e teste das redes neurais. O segundo bloco é responsável pelo treinamento e teste RNAs utilizadas para detecção dos defeitos. E o terceiro bloco é responsável pelo treinamento e teste das RNAs utilizadas para identificação das fases em que os defeitos ocorreram.

No quarto capítulo, os resultados referentes às simulações computacionais envolvendo medições de correntes foram expostos. O principal objetivo dessas simulações foi avaliar o

desempenho das RNAs quando utilizadas para detecção de cada um dos defeitos. Pode-se observar com os resultados obtidos que o desempenho das redes neurais foram bons, de maneira geral.

Como objetivo secundário dessas simulações, cita-se uma análise quanto à quantidade de medidores alocados no sistema de distribuição utilizado e quanto ao tipo de medição das correntes que foram utilizadas como entrada das RNAs. Através dos resultados, pode-se concluir que quando mais medidores foram utilizados, melhores os resultados das redes neurais por área e, quanto melhor a tecnologia de medição adotada, melhores os resultados na maior parte dos casos simulados. Algumas exceções foram observadas principalmente nas RNAs utilizadas para identificação de defeitos.

Outro ponto importante abordado nas mesmas simulações foi a análise sobre os principais fatores que prejudicam o desempenho das redes neurais quanto a cada tipo de defeito analisado. Essa análise é importante para futuros aperfeiçoamentos na técnica introduzida.

Foi possível verificar também que os sistemas de distribuição utilizados nas simulações possuem diferenças significativas. O sistema IEEE 13 barras possui mais ramificações apesar da menor extensão do alimentador. Além disso, possui maior demanda de energia. O sistema IEEE 34 barras possui menor ramificação, maior extensão e menor demanda. Sendo assim, conclui-se que o método proposto se adapta bem aos sistemas de distribuição, independentemente de suas características.

No quinto capítulo foram descritas as simulações computacionais utilizando medições de tensão em barras terminais do sistema IEEE 34 barras como entrada para RNAs utilizadas na detecção de defeitos por área predefinidas. Os resultados obtidos com esse tipo de simulação foi apresentado e mostraram um desempenho perfeito na detecção de defeitos que envolvem a abertura de condutores. O principal custo quanto ao método proposto é a grande quantidade de medidores que são necessários, quanto mais ramificado for o sistema.

No sexto capítulo, as simulações em tempo real envolvendo a comunicação do RTDS e do dSPACE foram realizadas. Foi possível verificar o funcionamento da lógica que envolve a utilização das redes neurais para detecção de defeitos em sistemas de distribuição trabalhando em tempo real. Os resultados obtidos comprovaram a eficiência e a robustez do método proposto, para futuras aplicações em sistemas reais.

7.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Durante a realização deste trabalho, vários pontos foram observados os quais potencialmente poderiam ser usados em trabalhos futuros, conforme apresentados a seguir:

- 1) Representação das gerações distribuídas (GDs) as quais já são uma realidade dos sistemas de distribuição e apresentam potencial de crescimento, uma vez que suprem certa necessidade de expansão dos sistemas de potência devido à geração mais próxima aos centros de cargas;
- 2) Análise de defeitos bifásicos e trifásicos, que por mais que muitas vezes sejam originados de defeitos monofásicos, podem ocorrer, de forma direta também;
- 3) Aplicação de testes em sistemas maiores como o IEEE 123 barras e/ou o sistema IEEE 8500 barras que são maiores e mais complexos que os demais utilizados neste trabalho;
- 4) Criação ou utilização de algum método que defina as melhores localizações para os medidores, de forma a obter a melhor eficiência das RNAs para detecção de faltas;
- 5) Utilização de sistemas de distribuição mais próximos aos sistemas brasileiros nas simulações, com rede secundária em baixa tensão com cabos neutros aterrados em alguns pontos;
- 6) Representação de outras características importantes para uma representação mais realística dos sistemas de distribuição, como por exemplo, a variação da impedância dos alimentadores de acordo com a temperatura e a possibilidade de reconfiguração dos alimentadores através de chaves seccionadoras controladas a distância;
- 7) Avaliação de custos referentes as simulações realizadas, englobando o tipo de medição realizado e o número de medidores alocados nos sistemas;
- 8) Avaliar possíveis falhas em equipamentos de medição e seus efeitos nos resultados da proteção como um todo;
- 9) Avaliar e estudar possíveis erros na comunicação dos equipamentos envolvidos nas simulações em tempo real;
- 10) Utilização de outros tipos de dados como entrada das redes neurais na tarefa de detecção de defeitos. A combinação entre medições de tensão e de correntes pode ser relevante;
- 11) Estudar e aplicar procedimentos de atuação nos sistemas mediante situações de defeito, bem como o reestabelecimento do sistema após retirada dos defeitos.

REFERÊNCIAS

ABDEL-AZIZ, A. M., HASANEEN, B. M.; DAWOOD A. A. Detection and Classification of One Conductor OpenFaults in Parallel Transmission Line using Artificial Neural Network. **International Journal of Scientific Research & Engineering Trends**, v. 2, n. 6, p. 139-146, 2016.

ACÁCIO, Luciana Carvalho. **Alocação ótima de medidores para fins de detecção de falhas**. 2017. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2017.

ANEEL. **Painel de Desempenho das Distribuidoras de Energia Elétrica por Município**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/>. Acesso em: 22 jan. 2010.

ARCHETTI, João Antônio Guédes. **Estudo e regulação dos níveis de tensão em sistemas de distribuição com alta penetração de renováveis utilizando simulações em tempo real**. 2019 Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2019.

ARIAS, Juan Camilo García. **Identificação de faltas de alta impedância em redes aéreas multiaterradas**. 2015. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

CEMIG. **O que são redes inteligentes de energia?** Disponível em: <http://www.cemig.com.br/pt-br/Paginas/default.aspx>. Acesso em: 18 fev. 2019.

CHAITANYA, B. K.; YADAV, A. An intelligent fault detection and classification scheme for distribution lines integrated with distributed generators. **Computers & Electrical Engineering**, v. 69, p. 28–40, 2018.

CHAKRABORTY, S.; DAS, S. Application of Smart Meters in High Impedance Fault Detection on Distribution Systems. **IEEE Transactions on Smart Grids**, v. 10, n. 3, p. 3465-3473, 2019.

DEHGHANI, F.; NEZAMI, H. A new fault location technique on radial distribution systems using artificial neural network. In: 22nd INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON ELECTRICITY DISTRIBUTION (CIRED). Estocolmo, 2013.

FANUCCHI, Rodrigo Zempulsky. **A Detecção e a Localização de Faltas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição Utilizando Transformadas Wavelets e Redes Neurais Artificiais**. 2014. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

FARIAS, P. E., MORAIS, A. P. de, ROSSINI, J. P.; CARDOSO, G. Non-linear high impedance fault distance estimation in power distribution systems: A continually online-trained neural network approach. **Electric Power Systems Research**, v. 157, p. 20-28, 2018.

GARCÍA, J., GARCÍA, V.; KAGAN, N. Detection of high impedance faults in overhead multi grounded networks. In: 11th IEEE/IAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS. Juiz de Fora, 2014.

GARCIA-SANTANDER, L., BASTARD, P., PETIT, M., GAL, I., LOPEZ, E.; OPAZO, H. Down-conductor fault detection and location via a voltage based method for radial distribution networks. **IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, v. 152, n. 2, p. 180-184, 2005.

GHADERIA, A., GINN III, H. L.; MOHAMMADPOURB, H. A. High impedance fault detection: A review. **Electric Power Systems Research**, v. 143, p. 376–388, 2017.

GILANY, M., AL-KANDARI, A.; HASSAN, B. ANN based technique for enhancement of distance relay performance against open-conductor in HV transmission lines. In: 2nd INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AND AUTOMATION ENGINEERING (ICCAE). Singapura, 2010.

GURURAJAPATHY, S. 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**, v. 74, p. 949–958, jul. 2017.

HAYKIN, Simon. **Redes Neurais: princípios e prática**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

IEEE PES. **IEEE Test Feeder Working Group**. Disponível em: <https://site.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>. Acesso em: 22 jan. 2020.

INFOESCOLA. **Tecido nervoso**. Disponível em: <https://www.infoescola.com/biologia/tecido-nervoso/>. Acesso em: 04 nov. 2019.

JAYAMAHA, D., MADHUSHANI, I. H. N., GAMAGE, R. S. S. J., TENNAKON, P. P. B. L.; ROHAN, U. Open conductor fault detection. In: MORATUWA ENGINEERING RESEARCH CONFERENCE (MERCon). Moratuwa, 2017.

JAVADIAN, S.; MASSAELI, M. A fault location method in distribution networks including DG. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 4, n. 11, p. 1446-1451, nov. 2011.

LAU, S. K.; HO, S. K. Open-circuit fault detection in distribution overhead power supply network. **Journal of International Council on Electrical Engineering**, v. 7, n. 1, p. 269-275, 2017.

LEDESMA, Jorge Javier Giménez. **Metodologia para Detecção, Identificação e Localização de Defeitos de Alta Impedância com a presença de Geração Distribuída**. 2016. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.

LIU, Y., SUN, J., GONG, G., ZHANG, X.; ZHANG, L. Open-Circuit Fault in EHV/UHV Transmission System and New Zero Sequence Over-current Protection Scheme. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY (POWERCON). Guangzhou, 2018.

LUCAS, F., COSTA, P., BATALHA, R.; LEITE, D. High Impedance Fault Detection in Time-Varying Distributed Generation Systems Using Adaptive Neural Networks. In: INTERNATIONAL JOINT CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS (IJCNN). Rio de Janeiro, 2018.

MICHALIK, M., LUKOWICZ, M., REBIZANT, W., LEE, S.; KANG, S. New ANN-Based Algorithms for Detecting HIFs in Multigrounded MV Networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 23, n. 1, p. 58–66, 2008.

NARESHKUMAR, A. Series (Open conductor) fault distance location in three phase transmission line using artificial neural network. **International Journal of Scientific Research Engineering & Technology (IJSRET)**, v. 3, n. 7, p. 1067-1071, out. 2014.

OLIVEIRA, A. R., GARCIA, P. A. N., OLIVEIRA, L. W., OLIVEIRA, E. J.; SILVA, H. A. Fault Classification in Distribution Systems Based on Fault Current Angles. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 1, p. 199-205, jan. 2016.

ONS. **O Sistema Interligado Nacional**. Disponível em: <http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>. Acesso em: 15 fev. 2019.

PIRIS, R.; BORBA, S. Vantagens da instalação para as empresas de transmissão e para o operador nacional do sistema de PMU/SPMS (unidade de medição fasorial/sistemas de medição fasorial sincronizada). In: X SIMPÓSIO DE ESPECIALISTAS EM PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO E EXPANSÃO ELÉTRICA. Florianópolis, 2006.

REN, J., VENKATA, S. S.; SORTOMME, E. An Accurate Synchrophasor Based Fault Location Method for Emerging Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 29, n. 1, p. 297–298, 2014.

RUSSELL, B. D., AUCOIN, M., BENNER, C. L., JONES, R. H., LEE, R. E., CARR, J., ELMORE, W. A., GRIFFIN, C. H. VOLZKA, D. R.; REEDY, R. M. Detection of downed conductors on utility distribution systems. **IEEE Tutorial Course**, 1989.

SANTOS W. C., LOPEZ, F. V., BRITO, N. S. D.; SOUZA, B. A. High-Impedance Fault Identification on Distribution Networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 32, n. 1, p. 23-32, 2017.

SANTOS, W. C., SOUZA, B. A., BRITO, N. S. D., COSTA, F. B.; PAES, M. R. C. High-impedance faults: From field tests to modelling. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, v. 24, n. 6, p. 885-896, 2013.

SARWAGYA, K., DE, S.; NAYAK, P. K. High-impedance fault detection in electrical power distribution systems using moving sum approach. **IET Science, Measurement & Technology**, v. 12, n. 1, p. 1–8, 2017.

SARWAR, M., MEHMOOD, F., ABID, M., KHAN, A. Q., GUL, S. T.; KHAN, A. S. High impedance fault detection and isolation in power distribution networks using support vector machines. **Journal of King Saud University - Engineering Sciences**. jul. 2019.

SEL. **Sincrofasores**. Disponível em: <https://selinc.com/pt/solutions/synchrophasors/>. Acesso em: 05 nov. 2019.

SHI, F.; CONG, W. Methodology to differentiate type of single-phase line break fault in 10kV ungrounded distribution networks. In: IEEE PES ASIA-PACIFIC POWER AND ENERGY ENGINEERING CONFERENCE (APPEEC). Hong Kong, 2014.

SOUZA, Frankelene Pinheiro de. **Identificação de faltas de alta impedância por análise de características cicloestacionárias**. 2017. 94 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecatrônica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

TORRES, V., RUIZ-PAREDES, H. F., VENEGAS, R. V., RAMÍREZ, Z. S.; TORRES, G. J. P. HIF analysis using discrete wavelet transform. In: IEEE INTERNATIONAL AUTUMN MEETING ON POWER, ELECTRONICS AND COMPUTING (ROPEC). Ixtapa, 2017.

VIANNA, J. T. A., ARAUJO, L. R.; PENIDO, D. R. R. High Impedance Fault Area Location in Distribution Systems Based on Current Zero Sequence Component. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 2, p. 759-766, fev. 2016.

WANG, X. DING, T.; XU, W. An Open Conductor Condition Monitoring Scheme Using Natural Voltage and Current Disturbances. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 34, n. 3, p. 1193-1202, jun. 2019.

WILSON, R. A.; VADLAMANI, V. Detecting open phase conductors. In: 68th ANNUAL CONFERENCE FOR PROTECTIVE RELAY ENGINEERS. College Station, 2015.

ZAYANDEHROODI, H., MOHAMED, A., SHAREEF, H.; MOHAMMADJAFARI, M. Determining exact fault location in a distribution network in presence of DGs using RBF neural networks. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION REUSE & INTEGRATION. Las Vegas, 2011.

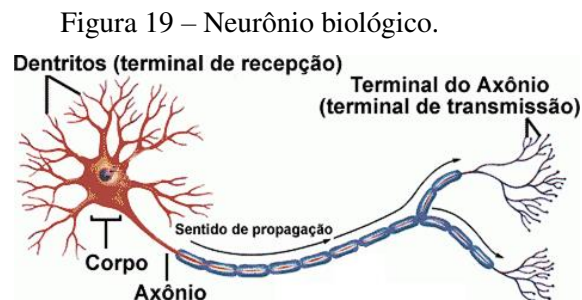
APÊNDICE A -REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

A tarefa de detecção de faltas em sistemas de potência pode ser resumida, na grande maioria dos casos, como encontrar situações anormais de operação dentro de padrões disponibilizados por medidores de energia. Dessa forma, o maior desafio dos pesquisadores tem sido encontrar uma maneira de detectar automaticamente as faltas em meio à padrões de operação normal dos sistemas. Nessa tarefa, descam-se vários algoritmos dotados de inteligência artificial (IA), os quais muitas vezes são inspirados em comportamentos naturais, como as redes neurais artificiais, os algoritmos genéticos, árvores de decisões, etc. Neste trabalho, especificamente, utiliza-se o conhecimento das RNAs para a tarefa de separação de padrões.

A.1 BREVE HISTÓRICO

Os cientistas, há muitos anos, vem tentando reproduzir, de forma mais simplificada, o comportamento do cérebro humano em máquinas. Para tanto, foi necessário primeiramente estudar e entender estruturalmente o que ocorria no interior do cérebro (HAYKIN, 2001).

O primeiro trabalho produzido a respeito da inteligência de funcionamento do cérebro humano foi produzido em 1943 por McCulloch e Pitts. Este trabalho foi inspirado no funcionamento de um neurônio biológico e só foi possível com o desenvolvimento da medicina nos últimos 100 anos. O neurônio biológico é a principal célula do sistema nervoso e é dividido em três partes: os dentritos (terminal de recepção), o corpo celular (processamento) e o axônio (terminal de transmissão). A Figura 19 mostra um esquema de um neurônio biológico.



Fonte: Retirado de (INFOESCOLA, 2019).

A transmissão de informações de um neurônio para o outro ocorre dos terminais de transmissão do axônio de um neurônio para os dendritos de outro neurônio, em um processo denominado sinapse.

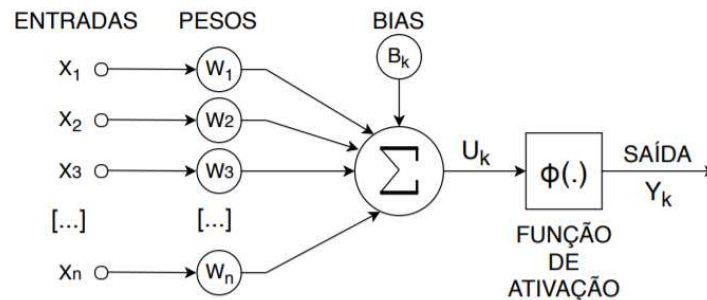
Em 1958 as redes neurais ganharam mais campo com a pesquisa de Rosenblatt desenvolvendo um neurônio artificial que classificava resultados de forma linear, denominado *Perceptron*. Posteriormente, a partir do trabalho de Rosenblatt, adicionaram-se mais neurônios dispostos em camadas para classificações não-lineares de padrões, formando as redes neurais *Perceptron* multicamadas.

A partir dos anos 80, surgiram outros trabalhos para complementar o arcabouço das RNAs. Em 1986, os pesquisadores Rumelhart, Hinton e Williams introduziram o poderoso algoritmo *Backpropagation* para treinamento das redes que até os dias atuais vem sendo bastante empregado.

A.2 NEURÔNIO ARTIFICIAL

A estrutura de um neurônio artificial é mostrada na Figura 20. É possível identificar as principais estruturas de composição do neurônio: entradas, pesos, bias, função de ativação e saída.

Figura 20 – Neurônio artificial.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As entradas do neurônio artificial são como os dendritos que recebem informações de outros neurônios. Essas entradas são multiplicadas pelos pesos sinápticos, que representam a passagem de um neurônio para outro. O parâmetro bias funciona como um *offset* para a função de ativação, na qual, a entrada do neurônio é processada para fornecer uma saída adequada. A função de ativação e a saída do neurônio são como o corpo celular e o terminal do axônio respectivamente.

Matematicamente, a entrada do neurônio artificial (U_K) pode ser definida conforme a Equação (13).

$$U_K = \left(\sum_{i=1}^n x_i \times w_i \right) + B_K \quad (13)$$

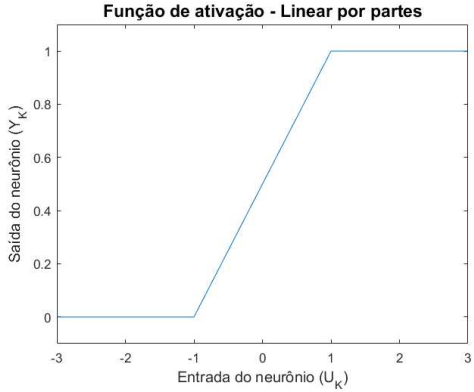
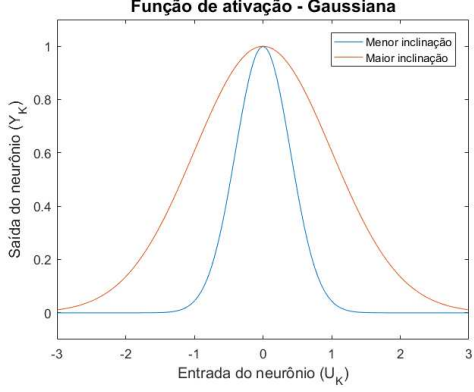
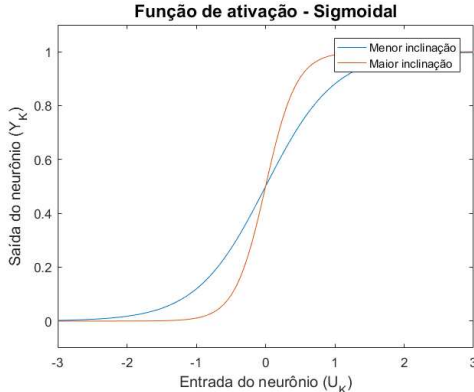
Posteriormente, a entrada do neurônio (U_K) é processada pela função de ativação (Φ) para fornecer uma saída adequada (Y_K), conforme a Equação (14).

$$Y_K = \Phi(U_K) \quad (14)$$

As funções de ativação (representadas por Φ) podem possuir diferentes equações de funcionamento. Algumas bem comumente utilizadas são a linear por partes, a gaussiana e a sigmoideal. A Tabela 35 exemplifica o funcionamento dessas três para certos intervalos predefinidos.

Pode-se perceber que as três funções de ativação exemplificadas estão ajustadas para fornecer uma saída no intervalo $[0,1]$. No entanto, outros intervalos podem ser utilizados pelo programador de acordo com a necessidade de utilização das redes neurais para o método proposto.

Tabela 35 – Tipos comuns de funções de ativação.

| Função de ativação | Fórmula matemática | Exemplo | Definições do exemplo |
|--------------------|--|--|---|
| Linear por partes | $f(x) = \begin{cases} 0; & x < x_1 \\ 1; & x > x_2 \\ ax + b, & c. c. \end{cases}$ |  <p>Função de ativação - Linear por partes</p> | <p>$x \in [-3,3]$</p> <p>$x_1 = -1$</p> <p>$x_2 = 1$</p> <p>$a = 0,5$</p> <p>$b = 0,5$</p> |
| Gaussiana | $f(x) = e^{\left(\frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2}\right)}$ |  <p>Função de ativação - Gaussiana</p> | <p>$x \in [-3,3]$</p> <p>$\sigma = 0,4$ (menos inclinada)</p> <p>$\sigma = 1$ (mais inclinada)</p> <p>$c = 0$ (ambas)</p> |
| Sigmoïdal | $f(x) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}}$ |  <p>Função de ativação - Sigmoïdal</p> | <p>$x \in [-3,3]$</p> <p>$a = 2$ (menos inclinada)</p> <p>$a = 4,5$ (mais inclinada)</p> <p>$c = 0$ (ambas)</p> |

Fonte: Elaborado pelo autor.

A.3 ARQUITETURA DE REDES NEURAIS

As redes neurais artificiais usadas para separação de padrões são compostas por vários neurônios agrupados em camadas com características próprias.

A primeira camada, normalmente, apenas recebe os valores de entrada da rede, sem realizar nenhum tipo de processamento, semelhante à neurônios sensoriais no corpo humano. Esta camada é denominada camada de entrada.

Já a última camada das redes neurais é composta por neurônios que fornecem respostas com o mesmo padrão de saída desejado durante treinamento da rede (denominados alvos, ou *targets*). Obviamente, em muitos casos, os resultados de saída não são exatamente iguais aos alvos, necessitando de algum tipo de arredondamento. A última camada é denominada camada de saída.

Entre as camadas de entrada e de saída normalmente pode-se ter uma ou mais camadas agrupando neurônios para um melhor processamento de dados. A quantidade de camadas pode ser alterada de acordo com a necessidade do programador. Essas camadas são denominadas ocultas ou intermediárias.

Sendo assim, as redes neurais podem ser classificadas em dois grupos quanto ao tipo de arquitetura, independentemente do número de camadas internas (ACÁCIO, 2017):

- 1) **Redes *feedforwards***: são redes cujas informações são passadas pelas camadas internas na ordem de construção da rede, ou seja, da camada de entrada para as camadas intermediárias se houver e para a camada de saída, sem nenhum tipo de realimentação.
- 2) **Redes recorrentes**: são redes cujas informações, em algum momento, são realimentadas para camadas anteriores. Esta realimentação resulta em um comportamento dinâmico não linear das redes.

A.4 TIPOS DE TREINAMENTO DAS REDES NEURAIS

As redes neurais são projetadas para aprenderem determinados padrões de características para posteriormente serem usadas para classificação dos padrões autonomamente. Dessa forma, durante o processo de treinamento das redes, todos os parâmetros internos como os pesos e bias são ajustados de forma a indentificar os padrões desejados. Existem duas principais formas de treinamento das redes neurais:

- 1) Treinamento supervisionado: neste tipo de treinamento, são fornecidos os dados de entrada bem como os alvos da rede (valores esperados na saída). Dessa maneira, a rede deve ajustar os parâmetros internos e ao obter a saída, esta é comparada ao alvo desejado, posteriormente, o erro entre esses valores é utilizado para reajuste dos parâmetros internos progressivamente, até que o erro seja o menor possível ou zero.
- 2) Treinamento não supervisionado: neste tipo de treinamento, apenas são fornecidos os dados de entrada das redes. Dessa forma, a própria rede neural deve encontrar padrões estatísticos nas entradas fornecidas e separá-las em grupos, isto é, a própria rede neural classifica as entradas em certo número de grupos.

APÊNDICE B -CONCEITOS BÁSICOS DO OPENDSS

O Open Distribution System Simulator (OpenDSS) é um software atualmente desenvolvido pela EPRI para simulação de sistemas de distribuição de energia elétrica. Normalmente, este programa é mais utilizado através comandos em uma interface para o usuário onde se descreve os elementos que formam o circuito, bem como obtem-se a solução e visualiza-se resultados obtidos. No entanto, neste trabalho, o OpenDSS é executado através de uma interface com o Matlab, isto é, os comandos para a simulação de um sistema são setados no Matlab e simulados no OpenDSS. Dessa forma, torna-se mais fácil trabalhar com as entradas e os resultados nas simulações.

A descrição de elementos que formam o sistema de distribuição seguem certos padrões que diferem o OpenDSS de outros simuladores convencionais. A principal diferença consiste em não se necessitar listar as barras que compõem o sistema. As barras são inicializadas no momento da inclusão dos demais elementos e o próprio programa conecta de forma inteligente os elementos a partir de suas descrições. A Tabela 36 mostra os principais elementos que compõem um sistema de distribuição. Estes elementos serão melhor descritos, posteriormente.

Tabela 36 – Principais elementos que compõem os sistemas de distribuição.

| Elemento | Característica | Comando |
|-----------------|--|----------------------------|
| Circuit | Define o ponto de conexão do sistema de distribuição | New Object=circuit.NOME |
| Line | Define as linhas do sistema | New Line. NOME |
| Linecode | Agrupa características comuns a mais de uma linha | New Linecode.NOME |
| Transformer | Define os transformadores que compõem o sistema | New Transformer.NOME |
| Load | Define as cargas que compõem o sistema | New Load.NOME |
| Capacitor | Define os capacitores que compõem o sistema | New Capacitor.NOME |

Fonte: Elaborado pelo autor.

B.1 ELEMENTO CIRCUIT

Basicamente, o elemento Circuit é utilizado para criar um equivalente de Thevennin do sistema de potência que fornece energia para o sistema de distribuição simulado, isto é, o elemento é um equivalente do sistema visto através de um ponto, normalmente a subestação. Por definição, sabe-se também que através do equivalente de Thevennin é possível obter informações a respeito da capacidade de entrega de energia no ponto de conexão do sistema. Para a criação de um sistema utilizando o OpenDSS é necessário a utilização do elemento Circuit e, apenas um deste.

Dessa forma, para definir o elemento Circuit no OpenDSS é necessário declarar alguns parâmetros referentes ao equivalente, tais como:

- 1) O valor da tensão de linha no ponto;
- 2) A barra na qual o equivalente está conectado;
- 3) O número de fases do equivalente;
- 4) E algum dentre os seguintes pares de informações: impedâncias de sequência zero e positiva; correntes de curto-circuito monofásica e trifásica; ou potências de curto-circuito monofásica e trifásica no ponto equivalente.

B.2 ELEMENTO LINE E ELEMENTO LINECODE

O elemento Line é utilizado para simular as linhas do sistema de distribuição. Essas linhas são ajustadas através do modelo pi e, na maior parte dos casos são desequilibradas. Dessa maneira, supondo-se uma linha trifásica a três fios e sem capacitâncias próprias e mútuas, pode-se obter a queda de tensão entre as barras, conforme a Equação (15).

$$\begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_a + jX_a) & jX_{ab} & jX_{ac} \\ jX_{ab} & (R_b + jX_b) & jX_{bc} \\ jX_{ac} & jX_{bc} & (R_c + jX_c) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (25)$$

O termo das impedâncias descrito na Equação (15) pode ser simplificado de acordo com a Equação (16).

$$Z = R + jX = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} X_a & X_{ab} & X_{ac} \\ X_{ab} & X_b & X_{bc} \\ X_{ac} & X_{bc} & X_c \end{bmatrix} \quad (16)$$

Cabe a ressalva de que a matriz de resistências pode possuir valores não nulos nas posições de resistências mútuas mediante aplicação da redução de Kronn.

Dessa forma é possível descrever o comportamento das tensões nas barras que compõem a linha a partir da variação das correntes e vice-versa. Então, os parâmetros necessários para definir o elemento Line no OpenDSS são:

- 1) O número de fases que compõem a linha (incluindo o neutro como uma fase, quando houver);
- 2) As barras entre as quais a linha está conectada;
- 3) O tamanho da linha e unidade referente ao tamanho (milhas ou quilômetros);
- 4) As partes triangulares inferiores referentes às matrizes de resistência e indutância da linha;
- 5) A parte triangular inferior referente à matriz de capacitância da linha, quando houver.

Nos sistemas de distribuição, várias linhas podem possuir características elétricas semelhantes (resistência, indutância e capacitância) e apenas tamanhos diferentes. Então, no OpenDSS é possível definir-se o elemento Linecode que funciona como um código no qual armazena-se as matrizes triangulares inferiores e, no momento de definição dos elementos Line apenas escreve-se o código criado para utilizar as matrizes armazenadas.

Para definir o elemento Linecode no OpenDSS é necessário declarar os seguintes parâmetros:

- 1) Matrizes triangulares inferiores de resistência, indutância e capacitância (quando houver);
- 2) Frequência base do sistema no local da linha;
- 3) Número de fases;
- 4) Unidade de medida de distância nas matrizes triangulares (quilômetros ou milhas);

B.3 ELEMENTO TRANSFORMER

O elemento Transformer é contruído com base no circuito equivalente de um transformador no qual se modelam as perdas magnéticas através de indutores bem como as perdas por aquecimento através das resistências. Dessa maneira, os parâmetros necessários para delcação deste elemento são:

- 1) A conexão entre os enrolamentos do trafo;
- 2) Tensão primária e secundária do trafo;
- 3) As barras em que cada lado do trafo se conectam;
- 4) Reatância de dispersão do fluxo magnético;
- 5) Corrente de magnetização do núcleo;
- 6) Resistência de perdas em vazio;
- 7) Resistência de perda Joule nos enrolamentos;

B.4 ELEMENTO LOAD

O elemento Load do OpenDSS são as cargas do sistema de distribuição. Essas cargas podem ser modeladas por diversos métodos disponíveis na biblioteca do OpenDSS. Os principais modelos disponíveis são:

- 1) Potência constante;
- 2) Corrente constante;
- 3) Impedância constante;
- 4) Modelo ZIP (associação entre as anteriores);
- 5) Potência ativa constante e reativa quadrática (semelhante a alguns motores);

Portanto, para declaração do elemento Load no OpenDSS é necessário fornecer o tipo de carga (conforme exemplificado) e outros parâmetros, tais como:

- 1) A barra em que a carga está conectada;
- 2) O número de fases da carga;
- 3) A tensão de linha nominal da carga;
- 4) A conexão da carga (delta ou estrela);

- 5) Dois dos seguintes valores nominais da carga: potência ativa, potência reativa, potência aparente e fator de potência;

B.5 ELEMENTO CAPACITOR

O elemento Capacitor é utilizado para conectar um capacitor no sistema de distribuição. Este capacitor pode ser conectado tanto em série, quanto em paralelo. Para declarar o elemento Capacitor é necessário fornecer os seguintes parâmetros:

- 1) O número de fases do elemento;
- 2) A(s) barra(s) em que o capacitor está conectado;
- 3) A potência nominal do elemento;
- 4) A tensão de linha nominal nos terminais do elemento;

APÊNDICE C -TIPOS DE MEDIÇÕES

Neste trabalho, foram propostos diferentes tipos de medições durante as simulações de defeitos nos sistemas de distribuição. Assim, o objetivo deste texto é elucidar mais sobre o tema, de forma a facilitar a compreensão da metodologia adotada.

Nos sistemas de distribuição atuais, normalmente, realiza-se a medição de corrente ou tensão em apenas alguns locais, como por exemplo:

- 1) Na subestação de energia, na saída dos alimentadores.
- 2) Em alguns transformadores de distribuição, quando se deseja observar variações na tensão entregue aos consumidores.
- 3) Em religadores e/ou outros equipamentos estrategicamente conectados para realizar a proteção do sistema.

Além disso, normalmente a concessionária de energia está mais interessada pela rede de média tensão, devido ao maior número de consumidores afetados na ocorrência de algum problema. Ainda, cita-se que a alocação de medidores em toda a rede de baixa tensão tornaria o preço da proteção inviável.

C.1 MEDIÇÃO NÃO-FASORIAL

A medição não-fasorial consiste na obtenção apenas dos módulos das grandezas sob observação. Porém, como essas medições, na maior parte dos casos, são realizadas na média tensão dos sistemas de distribuição, torna-se necessário a utilização dos transformadores de medição. Esses transformadores realizam a conversão das grandezas com níveis mais altos de corrente e/ou tensão para níveis mais apropriados para a utilização dos medidores convencionais, sem perda de informação. Os transformadores de medição são os transformadores de correntes (TCs) e os transformadores de potencial (TPs) os quais normalmente são utilizados em série e em paralelo aos circuitos de média tensão, respectivamente. Através da variação de seus taps, esses transformadores fornecem em seus secundários níveis de corrente de 5A e de tensão de 115V, em condições nominais. Além de gerar grandezas com níveis mais palpáveis, mantendo-se as posições fasoriais,

a utilização desses equipamentos, permitem o isolamento entre os circuitos, garantido proteção aos operadores.

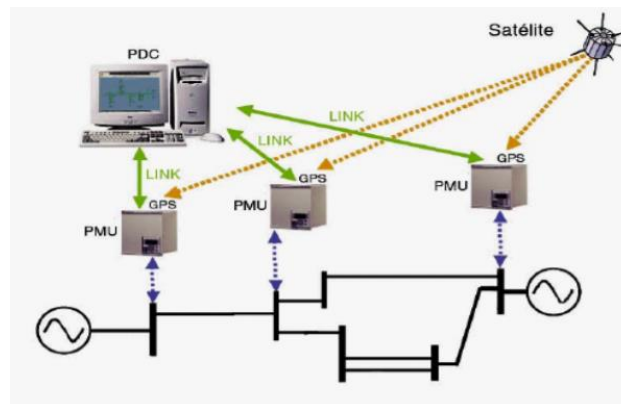
C.2 MEDIÇÃO FASORIAL

A medição fasorial está associada a obtenção dos fasores das grandezas a se obter, isto é, na obtenção do módulo e do ângulo dessas grandezas (as vezes na obtenção da frequência dessas grandezas também).

O conceito da medição fasorial está intimamente relacionado ao desenvolvimento da tecnologia para controle e medição dos sistemas de potência em geral. Nesse âmbito, surge o conceito dos sincrofasores e das PMUs (Unidades de medição fasorial ou, do inglês *phasor measurement units*). Os sincrofasores são medições fasoriais em varios pontos do sistema sob análise, sincronizadas com a utilização de relógios de tempo precisos via GPS. Através desses dados sincronizados é possível evitar erros de convergência e estimadores de estado, que por sua vez, garantem mais confiabilidade na estabilidade e na detecção de defeitos nos mais diversos sistemas (SEL, 2019).

Entre os equipamentos utilizados para a realização das medições fasoriais citam-se: os relógios sincronizados via satélite (GPS), as unidades de medição fasorial (PMUs), o concentrador de dados fasoriais (PDC) e os equipamentos de comunicação. A Figura 21 ilustra a configuração básica dos equipamentos (ACÁCIO, 2017).

Figura 21 – Configuração de sistema para medição fasorial.



Fonte: Retirado de Pires; Borba (2006) e Acácio (2017).

O principal empecilho quanto a utilização desse tipo de medição é o preço de aquisição desses equipamentos, muito superiores aos equipamentos de medição não-fasorial.

C.3 MEDIÇÃO EM SEQUÊNCIA

A medição em sequência consiste na obtenção das componentes simétricas, que por sua vez, são obtidas por meio da transformação das grandezas de fase através do teorema de Fortescue. Essa transformação normalmente é realizada com as correntes e tensões em sistema polifásicos de energia desequilibrados. Para os sistemas trifásicos, a transformação de Fortescue, fornece três componentes independentes, que podem ser tratadas em seus circuitos monofásicos equivalentes. Neste trabalho, propõe-se em alguns casos, a utilização de medições fasoriais de corrente para detecção de defeitos. As componentes de correntes utilizadas são:

- 1) Corrente de sequência positiva (I_1): correntes com o mesmo sentido de giro dos fasores das correntes de fase do sistema. Está relacionada com a corrente de operação em condições normais no sistema original.
- 2) Corrente de sequência negativa (I_2): correntes com o sentido de giro contrário em relação aos fasores das correntes de fase do sistema. Está relacionada com os desequilíbrios das correntes de fase do sistema original.
- 3) Correntes de sequência zero (I_0): correntes sem sentido de giro em relação aos fasores das correntes de fase do sistema. Está relacionada com as correntes que fluem para a terra no sistema original.

As componentes de corrente em sequência podem ser obtidas a partir das correntes de fase de acordo com a expressão da Equação (17).

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (17)$$

Sendo que α é um operador angular defasador em 120° .

Com o avanço da tecnologia de processamento, hoje existem relés microprocessados que realizam o cálculo das componentes de sequência muito facilmente. Dessa forma, torna-se mais

simples a utilização de dados em coordenadas simétricas principalmente na proteção de sistemas elétricos.

Alguns relés atuais já possuem funções de proteção que envolvem as correntes em coordenadas de sequência. A Tabela 37 mostra alguns exemplos de funções de proteções ANSI com utilização das coordenadas de sequência de correntes e tensões.

Tabela 37 – Funções ANSI com componentes de sequência.

| Função ANSI | Descrição |
|--------------------|--|
| 46 | Relé de reversão ou desbalanceamento de corrente |
| 47 | Relé de reversão ou desbalanceamento de tensão |
| 50N | Relé de sobrecorrente instantâneo de neutro |
| 51N | Relé de sobrecorrente temporizado de neutro |
| 51Q | Relé de sobrecorrente temporizado de sequência negativa com tempo definido |
| 59Q | Relé de sobretensão de sequência negativa |
| 67N | Relé de sobrecorrente direcional de neutro (instantâneo ou temporizado) |
| 87Q | Relé diferencial de sequência negativa |
| 87N | Relé diferencial de neutro |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como vários relés já incluem funções de proteção realizando a conversão de grandezas de fase para grandezas de sequência, conclui-se que essa possibilidade pode ser extrapolada para a detecção de faltas envolvendo a atuação de redes neurais artificiais.