**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
COMPUTAÇÃO**

LUCAS ASSIS DE MORAES FOGER

**Localização de Falhas em um Sistema de
Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Apenas
Dados de Tensão Pós-Falta como Entradas de um
Sistema de Inferência Fuzzy Multicamadas**

São Carlos
2019

LUCAS ASSIS DE MORAES FOGER

**Localização de Faltas em um Sistema de
Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Apenas
Dados de Tensão Pós-Falta como Entradas de um
Sistema de Inferência Fuzzy Multicamadas**

Tese de Doutorado apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos do Programa de Engenharia Elétrica para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Sistemas Dinâmicos.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Rogério Andrade Flauzino

São Carlos
2019

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

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

M8271 Moraes Foger, Lucas Assis de
 Localização de Faltas em um Sistema de
Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Apenas
Dados de Tensão Pós-Falta como Entradas de um Sistema
de Inferência Fuzzy Multicamadas / Lucas Assis de
Moraes Foger; orientador Rogério Andrade Flauzino. São
Carlos, 2019.

 Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas
Dinâmicos -- Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, 2019.

 1. Localização de faltas. 2. Distribuição de
energia elétrica. 3. Sistemas de inferência fuzzy. 4.
Modelagem e simulação de sistemas dinâmicos. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **LUCAS ASSIS DE MORAES FOGER**.

Título da tese: " Localização de faltas em um sistema de distribuição de energia elétrica utilizando apenas dados de tensão pós-falta como entradas de um sistema de inferência fuzzy multicamadas".

Data da defesa: 14/08/2019

Comissão Julgadora:

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

Prof. Dr. **Danilo Hernane Spatti**
(Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação/ICMC-USP)

Prof. Dr. **Ricardo de Andrade Lira Rabêlo**
(Universidade Federal do Piauí/UFPI)

Prof. Dr. **Eduardo Coelho Marques da Costa**
(Escola Politécnica/EP-USP)

Prof. Dr. **Hélder de Paula**
(Universidade Federal de Uberlândia/UFU)

Resultado:

Aprovado

Aprovado

Aprovado

Aprovado

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Ivan Nunes da Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

Dedico esta tese a todos aqueles que de alguma forma foram, continuam sendo e sempre serão referências positivas em minha vida. Pessoas em quem me espelho. Pessoas que admiro. Pessoas corretas. Pessoas simplesmente fantásticas e exemplares.

AGRADECIMENTOS

Às minhas famílias (àquela em que nasci, àquela que minha esposa agregou, e àquela que ainda formaremos) simplesmente por tudo. Em especial aos meus pais Valdomiro Francisco de Moraes e Tânia Regina de Assis Moraes, e à minha esposa Andrea Fogger Assis de Moraes.

Aos meus amigos, antigos ou recentes, de perto ou de longe, com os quais sei que posso contar. (Não citarei muitos nomes. Mas se você, meu amigo, está lendo isto, muito obrigado!). Em especial, a Marcel Ayres de Araújo e Oureste Elias Batista, que contribuíram enorme e diretamente no desenvolvimento desta tese.

Ao Professor Rogério Andrade Flauzino pela orientação, compreensão, paciência, e por todos os ensinamentos e conhecimentos passados a mim.

Ao Laboratório de Automação Inteligente de Processos e Sistemas (LAIPS) da USP, por disponibilizar toda a estrutura e equipamentos necessários para a realização das simulações e obtenção de resultados.

Ao CNPq pelo fomento e auxílio (Processo 142399/2014-0).

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação pela ajuda, atenção e apoio que me foram dados.

RESUMO

MORAES-FOGER, L. A. **Localização de Falhas em um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Apenas Dados de Tensão Pós-Falta como Entradas de um Sistema de Inferência Fuzzy Multicamadas.** 72 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

Este trabalho tem por objetivo localizar faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando apenas dados de tensão pós-falta. Não são utilizados dados de corrente pois sua medição não é um requisito mínimo dos medidores inteligentes. Os dados coletados são fornecidos a um sistema *fuzzy* multicamadas. A seleção dos dados de entrada para o treinamento do sistema inteligente é uma característica exclusiva deste trabalho, por ser continuação da metodologia desenvolvida durante o mestrado do autor desta tese. O cenário estudado é um alimentador de um sistema de distribuição real, com 1600 barras e 505 transformadores. Para efeito de comparação de resultados, a distância da falta é obtida de duas formas: pela composição das estimativas das impedâncias de sequência zero e positiva e pela estimativa direta da distância. Os resultados se mostram satisfatórios, com erros condizentes aos que são encontrados na literatura, sendo que a estimativa direta da distância da falta mostrou resultados ligeiramente melhores.

Palavras-chave: Localização de faltas. Distribuição de energia elétrica. Sistemas de inferência *fuzzy*. Modelagem e simulação de sistemas dinâmicos.

ABSTRACT

MORAES-FOGER, L. A. **Fault Location in an Electrical Energy Distribution System using only Post-Fault Voltage Data as Inputs of a Multilayer Fuzzy Inference System.** 72 f. Thesis (Doctorate) – Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

This work aims to locate faults in electrical energy distribution systems using only post-fault voltage data. Current data is not used because their measurement is not a minimum requirement of smart meters. The collected data is applied to a multilayer fuzzy inference system. The way voltage data is selected to train the fuzzy system is an exclusive feature of this work, since it is a continuation of the methodology developed during the master's dissertation of this thesis author. The scenario studied is a feeder of an actual distribution system, with 1600 buses and 505 transformers. For the purpose of results comparison, the distance of the fault is obtained in two ways: by the composition of the zero and positive sequence impedances estimations and by the direct estimation of the distance. The results are satisfactory, with errors that are consistent with those found in the literature, while the direct estimation of the fault distance presented slightly better results.

Keywords: Fault location. Electrical energy distribution. Fuzzy inference systems. Dynamic systems modeling and simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 – Rede elétrica inteligente: <i>smart grid</i> (adaptado de [1]).	20
Figura 2-1 – Diagrama de conexão da rede de sequência em uma falta fase-terra (adaptado de [11]).	26
Figura 2-2 – Estimação de múltiplos pontos possíveis de falta (adaptado de [13]).	27
Figura 2-3 – Circuitos equivalentes de uma falta [15], [16].	28
Figura 2-4 – Diagrama de Lattice [24].	30
Figura 3-1 – Exemplo de fuzzificação dos dados de temperatura (adaptado de [43]).	36
Figura 3-2 – Exemplo de agregação de duas regras <i>fuzzy</i> . Em cinza está a região <i>fuzzy</i> de saída obtida (adaptado de [43]).	37
Figura 3-3 – Representação das entradas do SIF multicamadas [5].	39
Figura 3-4 – SIF multicamadas [5].	40
Figura 3-5 - Algoritmo de extração das regras <i>fuzzy</i> (adaptado de [7]).	41
Figura 3-6 - Algoritmo de ajuste paramétrico (adaptado de [7]).	44
Figura 4-1 – Representação dos vetores da equação (4-2).	47
Figura 4-2 – Algoritmo de seleção de entradas.	47
Figura 4-3 – Sistema real usado nas simulações.	49
Figura 4-4 – Regras e funções de pertinência do SIF que estima Z_0 . (Entradas: V_A , V_{Ci} , V_{Bi} , V_{ABi} e V_{0i}).	51
Figura 4-5 – Comparação entre valor esperado e estimado de Z_0 .	52
Figura 4-6 – Histograma com quantidades de amostras de Z_0 .	52
Figura 4-7 – Histograma do erro da estimação de Z_0 (variância = 0,4265).	53
Figura 4-8 – Regras e funções de pertinência do SIF que estima Z_1 . (Entradas: V_A , V_{1i} , V_{Bi} , V_0 e V_{CA}).	54
Figura 4-9 – Comparação entre valor esperado e estimado de Z_1 .	55
Figura 4-10 – Histograma com quantidades de amostras de Z_1 .	55
Figura 4-11 – Histograma do erro da estimação de Z_1 (variância = 0,1625).	56
Figura 4-12 – Comparação entre valor esperado e estimado da distância da falta, quando calculada por meio da estimação das impedâncias.	57
Figura 4-13 – Histograma com quantidades de amostras da distância da falta, quando calculada por meio da estimação das impedâncias.	57

Figura 4-14 – Histograma do erro da estimação da distância da falta, quando calculada por meio da estimação das impedâncias (variância = 0,2370).....	58
Figura 4-15 – Regras e funções de pertinência do SIF que estima a distância da falta. (Entradas: V_A , V_{Ci} , V_{Bi} , V_{CA} e V_0).....	59
Figura 4-16 – Comparação entre valor esperado e estimado da distância da falta, quando obtida diretamente por meio do treinamento do SIF.	60
Figura 4-17 – Histograma com quantidades de amostras da distância da falta, quando obtida diretamente por meio do treinamento do SIF.	60
Figura 4-18 – Histograma do erro da estimação da distância da falta, quando obtida diretamente por meio do treinamento do SIF (variância = 0,2868).....	61
Figura 4-19 – Estudo de caso exemplificando o procedimento de localização de falta.	64

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Introdução ao tema	19
1.2	Objetivos	21
1.3	Motivações e Justificativas	21
1.4	Contribuições originais	22
1.5	Trabalhos realizados	22
1.6	Organização do texto da tese	24
2	MÉTODOS PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS NOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	25
2.1	Introdução	25
2.2	Métodos baseados na impedância aparente	25
2.3	Métodos baseados em ondas viajantes	29
2.4	Métodos baseados em sistemas inteligentes	31
2.5	Considerações sobre os métodos de localização de faltas em sistemas de distribuição	33
3	O SISTEMA DE INFERÊNCIA <i>FUZZY</i> MULTICAMADAS	35
3.1	Introdução	35
3.2	Camada de entrada	38
3.3	Camada de inferência.....	39
3.4	Camada de saída.....	40
3.5	Ajuste estrutural.....	41
3.6	Ajuste paramétrico	42

4	LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO SISTEMAS <i>FUZZY</i>	45
4.1	Introdução	45
4.2	Metodologia para seleção das entradas do sistema <i>fuzzy</i>	46
4.3	Modelagem do sistema de distribuição	48
4.4	Resultados da aplicação da metodologia desenvolvida no cenário estudado	50
4.4.1	Estimação da impedância de sequência zero	50
4.4.2	Estimação da impedância de sequência positiva	53
4.4.3	Cálculo da distância da falta com base na estimação das impedâncias de sequência	56
4.4.4	Estimação diretamente da distância da falta	58
4.4.5	Comparação dos resultados obtidos	61
4.5	Estudo de caso	63
5	CONCLUSÕES	65
	REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

1.1 Introdução ao tema

Em 15 de abril de 2010, foi criado pela portaria nº. 440 do Ministério de Minas e Energia (MME) um grupo de trabalho com o objetivo de "analisar e identificar ações necessárias para subsidiar o estabelecimento de políticas públicas para a implantação do Programa Brasileiro de Rede Elétrica Inteligente – *Smart Grid*". Este grupo de trabalho, que envolve órgãos como o próprio Ministério, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) e a Eletrobras, executou um relatório contendo estudos econômicos, tecnológicos, de viabilidade, de medição e de mercado para a implantação de *smart grids* no sistema elétrico brasileiro. O capítulo introdutório desta tese baseia-se majoritariamente neste relatório [1].

O conceito de *smart grids* fundamenta-se principalmente na comunicação e na aquisição de dados referentes aos sistemas elétricos de potência, mais especificamente aos sistemas de distribuição de energia. Os medidores inteligentes são elementos essenciais nesta tarefa, sendo instalados em cada ponto consumidor, substituindo os medidores tradicionais, agregando vantagens às concessionárias e aos consumidores e adicionando novas possibilidades ao relacionamento entre eles, tais como:

- Suspende e restabelece remotamente o fornecimento de energia;
- Obter informações relativas à qualidade do fornecimento de energia;
- Auxiliar o consumidor a estabelecer e alcançar metas de consumo;
- Reduzir o tempo de reparos em casos de mau funcionamento ou de sinistros que levem à interrupção do fornecimento;
- Permitir esquemas tarifários com múltiplos postos;
- Permitir ao consumidor atuar como produtor de energia ("prossumidor").

Além dos medidores inteligentes, a arquitetura das *smart grids* incentiva a instalação, em pontos estratégicos, de dispositivos concentradores de dados, que têm a função de coletar dados de vários consumidores em uma região e transmiti-los à concessionária, onde serão processados para que ações e decisões possam ser tomadas. Adicionalmente, pode-se incorporar

a estes dispositivos concentradores outros medidores inteligentes, informando à concessionária, por exemplo, o comportamento da média tensão do sistema de distribuição, o índice de qualidade de energia ou a existência de uma falta. A Figura 1-1 ilustra como seria a arquitetura de uma rede elétrica inteligente.

Figura 1-1 – Rede elétrica inteligente: *smart grid* (adaptado de [1]).

Como ilustrado acima, os medidores inteligentes também terão capacidade de se comunicar entre si em uma rede *mesh*, por meio de um protocolo de comunicação como o *ZigBee* [2]. Este procedimento operacional das *smart grids* não será tratado nesta tese, mas explicações e detalhamentos a seu respeito podem ser encontrados em [3].

Neste novo contexto de sistema elétrico que envolve as *smart grids*, continua sendo necessário garantir a qualidade e a continuidade do fornecimento de energia. Entretanto, faltas podem acontecer nas redes elétricas e ocasionar a interrupção do fornecimento de energia. As faltas caracterizam-se como eventos anormais no sistema elétrico que acontecem aleatoriamente e são muito prejudiciais à rede, especialmente devido às sobrecorrentes. A fim de preservar a rede de potenciais avarias, o sistema de proteção deve trabalhar corretamente e deve isolar o ponto de falta do restante da rede [4]. Quando uma falta não é sustentada, ou seja, quando o motivo que ocasiona a falta se extingue rapidamente, os religadores presentes na rede de distribuição garantem a continuidade do fornecimento de energia sem que seja necessária qualquer intervenção.

Contudo, no caso de uma falta sustentada, é preciso ir além. O sistema de proteção isola o ponto de falta, sendo esta a primeira etapa da resolução do problema. Em uma segunda etapa, o ponto deve ser localizado e reparado antes de ser reconectado à rede, o que deve ser feito da maneira mais rápida possível, para minimizar o tempo de interrupção no fornecimento de energia.

Mesmo com o desenvolvimento de novos sensores e equipamentos de medição e monitoramento instalados nos sistemas de distribuição de energia, localizar com exatidão o ponto em que ocorreu uma falta ainda não é uma tarefa simples. Deste fato derivam-se os objetivos deste trabalho.

1.2 Objetivos

Propõe-se como objetivo geral desta tese localizar faltas em um sistema de distribuição de energia elétrica. Mais especificamente, este trabalho visa localizar faltas do tipo fase-terra utilizando apenas dados de tensão pós-falta.

1.3 Motivações e Justificativas

As faltas que mais oferecem risco à vida são aquelas em que há conexão à terra. Dentre elas, as faltas fase-terra são as que mais comumente ocorrem em sistemas elétricos. Este é o motivo que levou o trabalho a investigar este tipo de faltas em sistemas de distribuição.

Para alcançar os objetivos descritos, utiliza-se o sistema inteligente desenvolvido em [5]. Trata-se de um Sistema de Inferência *Fuzzy* (SIF) multicamadas que recebe como entradas os dados de média tensão medidos após a ocorrência da falta, e retorna como saída sua localização. Estes dados são coletados em simulações de faltas em um sistema de distribuição real modelado em computador. Com isto, evita-se testes físicos experimentais que colocam em risco a confiabilidade do fornecimento de energia.

Os medidores inteligentes das *smart grids* são instalados no lado da baixa tensão do sistema de distribuição. Porém, os dispositivos concentradores de dados, se instalados junto a transformadores de distribuição, estarão em lugares propícios para facilitar a coleta de dados da média tensão, que são os dados usados nas simulações desta tese. O trabalho de [6] desenvolve uma Unidade de Medição Fasorial (PMU, da sigla em inglês) que é capaz de obter estes dados da média tensão por meio de medidas realizadas na baixa tensão refletidas para a média tensão

com base na modelagem de transformadores. Esta é uma solução de baixo custo e bom desempenho, que pode ser aplicada no conceito de *smart grids* para a medição das grandezas elétricas de interesse.

A justificativa para utilizar apenas dados de tensão baseia-se na Audiência Pública nº. 043/2010, instaurada pela ANEEL, que declara que os medidores inteligentes que serão instalados nas residências e estabelecimentos comerciais e industriais atendidos em baixa tensão deverão abranger, no mínimo, a medição da energia ativa, da energia reativa e da tensão de fornecimento [7]. Embora as PMUs sejam capazes de medir corrente elétrica na média tensão, por não se tratar de um requisito obrigatório dos medidores inteligentes, esta grandeza elétrica não será considerada nas simulações deste trabalho.

1.4 Contribuições originais

A seguir estão alguns pontos principais desenvolvidos nesta tese de doutorado que, agregados, definem suas contribuições originais.

Primeiramente, na literatura encontra-se com frequência o uso de dados de corrente ou de tensão e corrente para localizar uma falta, mas este trabalho emprega apenas dados de tensão. A vantagem de utilizar apenas uma grandeza elétrica está na redução da aquisição e processamento de dados.

O segundo ponto é que a distância da falta será calculada com base em medidores espalhados ao longo de um sistema de distribuição, e não com base em uma central ou subestação, como aparece em grande parte dos trabalhos da literatura. Esta abordagem de localização de faltas requer uma *smart grid* com infraestrutura de aquisição e comunicação de dados adequada, que em breve será a realidade do setor elétrico.

Por fim, a forma de redução de dimensão e seleção de dados de tensão para o treinamento do sistema inteligente é uma característica exclusiva deste trabalho, por se tratar da continuação da metodologia desenvolvida na dissertação de mestrado do autor desta tese [8]. Esta metodologia visa principalmente facilitar o treinamento do sistema inteligente.

1.5 Trabalhos realizados

O Laboratório de Automação Inteligente de Processos e Sistemas (LAIPS) propiciou ao autor desta tese a realização de diversos trabalhos científicos em conjunto com os demais

pesquisadores do grupo. A seguir estão todos os trabalhos publicados durante o período de doutorado, sendo que os dois últimos trabalhos listados foram publicados em periódicos.

- ARAUJO, M. A.; FLAUZINO, R. A.; MORAES, L. A.; BORGES, F. A. S.; SPATTI, D. H.: Decision Trees Applied to Fault Locations in Distribution Systems with Smart Meters. In: IEEE International Conference on Environmental and Electrical Engineering (IEEE EEEIC), 2019, Genova, Itália. Proceedings of IEEE EEEIC, 2019.
- ARAUJO, M. A.; FLAUZINO, R. A.; MORAES, L. A.; BATISTA, O. E.: Multilayer Fuzzy System Applied to Locate Faults in Distribution Systems Using Only Voltage Measurements. In: The Seventh International Conference on Smart Grids, Green Communications and IT Energy-aware Technologies (ENERGY), 2017, Barcelona. ENERGY 2017 Proceedings, 2017. p. 14.
- MORAES, L. A.; FLAUZINO, R. A.; ARAUJO, M. A.; BATISTA, O. E.: Sistema de Inferência Fuzzy Multicamadas Aplicado à Localização de Faltas em Sistemas de Distribuição usando Apenas Medições de Tensão. In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2016, Natal. Anais do SBSE, 2016.
- ARAUJO, M. A.; FLAUZINO, R. A.; BATISTA, O. E.; MORAES, L. A.; MARTINS, C. H. R.: Classificação de Distúrbios de Qualidade de Energia Elétrica Empregando Redes Neurais Artificiais. In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2016, Natal. Anais do SBSE, 2016.
- ARAUJO, M. A.; FLAUZINO, R. A.; BATISTA, O. E.; MORAES, L. A.; MARTINS, C. H. R.: Proteção de Alimentadores de Distribuição contra Tensões Induzidas por Descargas Atmosféricas Indiretas. In: Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2016, Natal. Anais do SBSE, 2016.
- ARAUJO, M. A.; FLAUZINO, R. A.; BATISTA, O. E.; MORAES, L. A.: Processo Otimizado de Proteção de Linhas de Distribuição Contra Descargas Atmosféricas Indiretas pela Utilização de Sistemas Fuzzy. In: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI), 2015, Natal. Anais do SBAI, 2015. p. 61-66.
- BORGES, F. A. S.; FERNANDES, R. A. S.; MORAES, L. A.; SILVA, I. N. da: Comparison Between Random Forest Algorithm and J48 Decision Trees Applied to the Classification of Power Quality Disturbances. In: World Congress in Computer Science, Computer Engineering, and Applied Computing (WORLDCOMP), 2015, Las Vegas. Proceedings of the 2015 International Conference on Data Mining (DMIN), 2015. p. 146-147.

- ARAUJO, M. A.; FLAUZINO, R. A.; BATISTA, O. E.; MORAES, L. A.: Analysis of the allocation of Surge Arresters in Distribution Lines against Induced Voltages by Indirect Lightning. In: World Congress in Computer Science, Computer Engineering, and Applied Computing (WORLDCOMP), 2015, Las Vegas. Proceedings of the 2015 International Conference on Artificial Intelligence (ICAI), 2015. p. 774-780.
- ARAUJO, M. A.; FLAUZINO, R. A.; BATISTA, O. E.; MORAES, L. A.: Procedure for protection of distribution feeder against induced voltages by indirect lightning. In: 2015 International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA), 2015, Balneário Camboriú. 2015 International Symposium on Lightning Protection (XIII SIPDA). p. 264-269.
- BATISTA, O. E.; FLAUZINO, R. A.; ARAUJO, M. A.; MORAES, L. A.; SILVA, I. N. da: Methodology for information extraction from oscillograms and its application for high-impedance faults analysis. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, v. 76, p. 23-34, 2016.
- ARAUJO, M. A.; FLAUZINO, R. A.; ALTAFIM, R. A. C.; BATISTA, O. E.; MORAES, L. A.: Practical methodology for modeling and simulation of a lightning protection system using metal-oxide surge arresters for distribution lines. Electric Power Systems Research (Print), v. 113, p. 17, 2014.

1.6 Organização do texto da tese

O texto da tese está estruturado em cinco capítulos. Após esse capítulo introdutório, será desenvolvido o Capítulo 2, que apresenta o estado da arte no que diz respeito aos métodos de localização de falta nos sistemas de distribuição de energia elétrica.

No Capítulo 3 será descrito o SIF multicamadas que será empregado para localizar faltas, abordando desde os fundamentos de um SIF, passando pela função de cada camada e indo até os ajustes paramétricos e estruturais do SIF utilizado neste trabalho.

O Capítulo 4 ilustra a metodologia proposta para identificar as entradas do sistema inteligente utilizado neste trabalho e a modelagem do sistema de distribuição onde a metodologia será aplicada. Também expõe, discute e compara os resultados obtidos, além de exemplificá-los com um estudo de caso.

Por fim, no Capítulo 5 estão as conclusões da tese e as intenções para trabalhos futuros.

2 MÉTODOS PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS NOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

2.1 Introdução

Um método de localização de faltas eficiente reduz consideravelmente o tempo de restabelecimento da energia elétrica na área ou região onde ocorreu a falta. Existem diversas abordagens possíveis para encontrar o ponto exato de falta, cada qual com suas vantagens, desvantagens e particularidades [9].

Neste capítulo serão discutidos os métodos mais usados na atualidade para localizar faltas em sistemas de distribuição, que têm apresentado resultados relevantes. Os métodos podem ser divididos em três categorias: baseados na impedância aparente (Seção 2.2), em ondas viajantes (Seção 2.3) e em sistemas inteligentes (Seção 2.4). Ainda há a Seção 2.5, que faz algumas considerações gerais sobre os métodos de localização de falta expostos.

2.2 Métodos baseados na impedância aparente

Este tipo de método de localização de faltas considera que a distância entre determinado ponto de medição e o ponto de falta é proporcional à impedância aparente vista a partir do ponto de medição calculada no momento da falta. Esta impedância aparente pode ser calculada por meio do método de análise de componentes simétricos [10].

Exemplificando para faltas fase-terra com impedância de falta nula, que são o tipo de falta estudado nesta tese, tem-se o conjunto de equações (2-1), onde a tensão na fase faltosa “A” vai a zero [10].

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

$$V_a = 0 = V_0 + V_1 + V_2$$

Como a soma das tensões de sequência é nula, o diagrama de conexão somente pode ser construído com os circuitos de sequência ligados em série e fechando uma malha. Com isto, as impedâncias de sequência, no momento da falta, também se comportam como conectadas em série, de forma que a impedância aparente torna-se a soma das impedâncias de sequência

positiva, negativa e zero, conforme mostrado no diagrama de conexão de rede de sequência na Figura 2-1 [10], [11].

Figura 2-1 – Diagrama de conexão da rede de sequência em uma falta fase-terra (adaptado de [11]).

Além disto, as impedâncias de sequência positiva e negativa são iguais em um sistema de distribuição [12]. Com estas informações, pode-se chegar à equação (2-2), que relaciona a distância da falta e a impedância aparente no momento da falta, sendo D a distância, Z_{ap} a impedância aparente, Z_0 e Z_1 as impedâncias de sequência zero e positiva respectivamente.

$$D \propto Z_{ap} = 2Z_1 + Z_0 \quad (2-2)$$

Uma grande vantagem do método da impedância aparente é que ele não requer nenhum sistema de georreferenciamento com medições sincronizadas para detectar o ponto de falta, já que a medição de parâmetros em um local da rede é suficiente, mas a principal desvantagem aparece quando esta equação é aplicada a sistemas de distribuição radiais, pois devido à sua ramificação, existe a possibilidade da estimação de múltiplos pontos possíveis de falta [9], como ilustrado pela Figura 2-2 [13].

Figura 2-2 – Estimação de múltiplos pontos possíveis de falta (adaptado de [13]).

O trabalho de [14] utiliza medidores de corrente e tensão espalhados ao longo do sistema de distribuição para indicar a localização da falta com base em cálculos de impedância aparente. O trabalho mostra estudos de casos reais, mas a metodologia empregada fornece como resultado apenas possíveis locais de falta. Cabe a um operador situado na subestação julgar os dados obtidos e indicar à equipe de campo o local mais provável onde se encontra a falta. Os autores informam que estão aumentando sua base de dados com eventos de falhas reais, e que, conforme mais dados são adquiridos, menos necessária será a intervenção humana.

Existem ainda outras abordagens para localizar falhas por meio da impedância aparente, dentre as quais se destaca a desenvolvida em [15]. Apesar de ter sido desenvolvida para linhas de transmissão, esta metodologia também é aplicável aos sistemas de distribuição, e sua notoriedade deve-se ao pioneirismo em sua forma de análise do sistema faltoso. Para localizar a falta, emprega-se o teorema da superposição e análise de circuitos para dividir o sistema em condição de falta em dois: um sistema pré-falta e outro puramente faltoso, como na Figura 2-3 [15], [16]. “S” é o terminal local, próximo à fonte e ao ponto de medição de tensão e corrente, e “R” é o terminal remoto, próximo à carga do sistema.

Conhecendo-se os parâmetros da linha e medindo-se tensão e corrente no terminal S antes e durante a falta é possível identificar a distância do ponto da falta com bastante eficácia, por meio da equação (2-3) [15], desde que a linha seja suficientemente pequena e não haja defasagem entre a corrente de falta e a corrente oriunda do terminal S, o que de fato ocorre em sistemas de distribuição.

$$D = \frac{Im(V_S \cdot (I_S - I'_S))}{Im(Z_S \cdot I_S \cdot (I_S - I'_S))} \quad (2-3)$$

Segundo [17], este método é bastante confiável quando a impedância de falta é nula, mas existe um grande aumento no erro de localização do ponto de falta conforme aumenta-se o valor da impedância de falta.

(a) Circuito monofásico em falta.

(b) Circuito pré-falta.

(c) Circuito puramente faltoso.

Figura 2-3 – Circuitos equivalentes de uma falta [15], [16].

Os autores a seguir valeram-se da superposição de circuitos para calcular a corrente de falta, para inseri-la na equação (2-3) e assim encontrar a distância, sempre fazendo alguma consideração para contornar o problema da impedância de falta. No trabalho [18], por exemplo, considerou-se que a impedância de falta é puramente resistiva, o que não impacta a equação (2-3), e então determina-se o ponto de falta.

A pesquisa [19] propõe a desconsideração das cargas do sistema. Assim, a corrente na falta é igual à corrente no ponto de medição, sendo a tensão no ponto de falta conhecida pois os parâmetros da rede também o são, de forma que se calcula então a impedância de falta, e, conseqüentemente, a impedância aparente via componentes simétricos, para finalmente encontrar a distância da falta ao ponto de medição.

Ainda com base no teorema da superposição, outras considerações foram feitas a fim de aumentar a exatidão da localização da falta em um sistema de distribuição. Medições não sincronizadas em dois terminais [20], instalação de indicadores de falta ao longo dos ramais de alimentação para determinar o caminho da falta [21] e processo iterativo de cálculo de corrente de falta [22] são algumas destas estratégias.

2.3 Métodos baseados em ondas viajantes

Outro método bastante utilizado para localizar faltas nos sistemas de distribuição baseia-se na teoria de ondas viajantes. Do ponto de vista de [23], um dos trabalhos clássicos que aplica esta teoria na localização de faltas, uma falta pode ser considerada como um ponto onde é injetada uma tensão na rede de igual amplitude, mas com fase oposta à tensão pré-falta. Esta tensão injetada viaja para ambos os lados da rede, sendo refletida e refratada em suas descontinuidades, ao mesmo tempo em que sua amplitude é atenuada.

O Diagrama de Lattice é uma ferramenta visual para facilitar a compreensão do comportamento das ondas viajantes. A Figura 2-4 ilustra este comportamento para um trecho de rede sem ramificações, com uma falta em sua segunda metade. O método consiste em medir o tempo entre a primeira (t_1) e a segunda (t_2) incidência da onda originada na falta, que viaja ao terminal A, é refletida nele, depois volta à falta, onde é refletida novamente e retorna ao terminal A [24].

Nota-se, entretanto, que pode haver uma localização incorreta da falta caso confunda-se o tempo da segunda incidência da onda refletida na falta (t_2) com a primeira incidência da onda refletida no terminal B (t_3). Uma alternativa para este impasse é a instalação de medidores

sincronizados em ambos os terminais, pois assim conhecem-se todos os tempos de incidência da onda viajante [25].

Figura 2-4 – Diagrama de Lattice [24].

As dificuldades começam a aumentar quando se considera um sistema de distribuição bastante ramificado, pois cada conexão do sistema é um ponto de descontinuidade onde a onda viajante será refletida e refratada, e assim a quantidade de tempos de incidência a serem medidos aumenta consideravelmente. Neste caso, como sincronizar e discriminar todos os tempos passa a ser ainda mais complicado, os autores de [26] propõem um algoritmo que faz a correlação cruzada da onda incidente no domínio do tempo para distinguir a onda refletida na falta das ondas refletidas nos demais terminais do sistema de distribuição.

Outra abordagem possível é a utilização da transformada de *wavelet*, que consegue detalhar as características no domínio do tempo e da frequência de ondas viajantes, mesmo que sejam não-estacionárias (devido às diversas reflexões e refrações), de forma a se determinar em que momento do tempo acontece um transitório de alta frequência, ou seja, uma falta [27], [28]. Os trabalhos [25], [29] e [30] aplicam esta metodologia para localizar faltas em sistemas de distribuição.

A principal vantagem da metodologia baseada em ondas viajantes, comparada com o método baseado na impedância aparente, é que não ocorre a múltipla estimativa, mas sim a localização única do ponto de falta [31]. Ao mesmo tempo, existem as desvantagens deste segundo método, que são a necessidade de sincronismo nas medições, ou alternativamente, a elevada frequência de aquisição dos dados, além da complexidade de implementação [32].

2.4 Métodos baseados em sistemas inteligentes

Este método de localização de faltas consiste no treinamento de sistemas inteligentes, como redes neurais artificiais, sistemas de inferência *fuzzy*, algoritmos genéticos ou enxame de partículas, com dados de faltas que aconteceram em um sistema de distribuição para então determinar a localização exata de uma falta que venha a acontecer no mesmo sistema. Esta metodologia costuma apresentar baixos erros de localização, mas sua limitação reside no fato de ela ser capaz de localizar faltas apenas nos sistemas de distribuição usados no treinamento. Caso haja uma mudança na topologia dos ramais do sistema de distribuição, é necessário treinar o sistema inteligente novamente para esta nova topologia [9], [32].

Há várias pesquisas na atualidade empregando sistemas inteligentes na localização de faltas, tanto na transmissão quanto na distribuição; entretanto, a referência [33] é um das únicas que propõe que a distância da falta seja a saída de seu sistema inteligente sem que haja investigação sobre a impedância aparente ou sobre as ondas viajantes resultantes da falta. O autor utiliza como entradas de uma rede neural artificial valores de tensão e corrente de harmônicos ímpares para localizar as faltas. O sistema de distribuição não possui ramificações, mas possui cargas distribuídas ao longo do alimentador. Os erros obtidos estão abaixo dos 4%.

É compreensível que quase não haja trabalhos para localizar faltas nos sistemas de distribuição que deixem de considerar as particularidades dos dois métodos clássicos supracitados nas Seções 2.2 e 2.3. Segundo o próprio autor de [33], os erros atingidos foram baixos porque o sistema de distribuição usado para treinamento não permitia múltiplas estimativas, por conter apenas um ramal.

Na literatura, é mais comum encontrar trabalhos que utilizam sistemas inteligentes alimentados com parâmetros característicos de um dos métodos clássicos de localização de faltas. Esta estratégia de mesclar um método clássico com um sistema inteligente visa sobrepujar as desvantagens presentes no primeiro com vantagens oferecidas pelo segundo.

A pesquisa realizada em [34], por exemplo, calcula a distância da falta utilizando o método da impedância aparente e estima diversos possíveis locais de falta. Depois, com a distância conhecida, os autores utilizam dados do afundamento de tensão no momento da falta para treinar uma rede neural a reconhecer padrões e identificar dentre todos os pontos possíveis aquele que indica a posição real da falta.

Já os autores de [35] utilizam como entradas de uma rede neural artificial os parâmetros obtidos por meio da transformada *wavelet* aplicada às correntes de linha do alimentador padrão de 34 nós do IEEE. Os erros alcançados são bastante reduzidos, sendo inferiores a 2%.

Também empregando transformada *wavelet* e redes neurais, [36] desenvolve um sistema de detecção e localização, utilizando a transformada para detectar alterações de frequência nos sinais de corrente e posteriormente aplica módulos e ângulos de correntes e tensões de fase, corrente de sequência zero e tensão da terceira harmônica como entradas do sistema inteligente para obter a localização da falta. Os erros são inferiores a 7%.

Outro exemplo bastante interessante com a mesma combinação de métodos aparece em [37]. Os autores fazem a medição de ondas viajantes em dois terminais e comparam a eficácia do método de localização por ondas viajantes com medições sincronizadas e o método onde os parâmetros da transformada *wavelet* são as entradas de uma rede neural artificial. Embora ambas as abordagens tenham apresentado erros bastante ínfimos, o uso da rede neural apresentou o menor deles, inferior a 1%. Os autores atribuem isto ao fato de a rede neural ter a capacidade de considerar e aprender características não-lineares do sistema de distribuição durante seu treinamento.

O trabalho de [38] utiliza um sistema *neuro-fuzzy* cujas entradas são os parâmetros *wavelet* de tensão e corrente para localizar faltas em um sistema de distribuição de energia. Cinco mil faltas foram simuladas ao total, considerando a presença e a ausência de geração distribuída no sistema elétrico. Os índices de acerto foram de cerca de 80% quando era considerada a presença de geração distribuída e de cerca de 90% quando era considerada sua ausência.

Há trabalhos que empregam redes neurais profundas na localização de falta, dando destaque aos *auto-encoders*, para diminuir a dimensão das entradas e saídas do sistema inteligente. Por exemplo, os autores de [39] utilizam um *auto-encoder* aplicado ao método de ondas viajantes para localizar faltas em um sistema de transmissão HVDC. Os maiores erros obtidos para a localização foram em torno de 5%.

A referência [40] utiliza uma rede neural profunda para analisar dados de tensão e corrente e classificar tipos diferentes de ocorrência de faltas (na conexão entre dois cabos, na extremidade de um cabo, ou no meio do cabo). Embora este seja um problema de classificação de padrões do ponto de vista da rede neural, pode-se interpretá-lo também como um problema de localização de falta, devido à escolha peculiar dos autores a respeito das saídas da rede neural.

2.5 Considerações sobre os métodos de localização de faltas em sistemas de distribuição

Ao analisar as mais recentes pesquisas relacionadas à localização de faltas em sistemas de distribuição percebe-se que seus índices de acerto são bastante satisfatórios. A metodologia mais empregada é a utilização de sistemas inteligentes cujas entradas são parâmetros *wavelet* pós-falta, de tensão e corrente, ou apenas de corrente. Um detalhe importante é que em todos os métodos apresentados há a medição de corrente, como algo imprescindível para a correta e precisa localização da falta.

Dentre os trabalhos na literatura, vale a pena destacar dois deles, devido a algumas semelhanças existentes entre eles e esta tese. O trabalho [14] citado anteriormente tem dois grandes pontos que tocam a abordagem utilizada nesta tese, que são a utilização de medidores (de tensão e corrente) espalhados ao longo da rede de distribuição e localização da falta com base na impedância aparente. Entretanto, esta tese se difere por utilizar apenas dados de tensão pós-falta. Além disso, a localização da falta será de forma automática nesta tese, enquanto [14] depende da análise de um operador do sistema.

Há ainda outro trabalho especialmente interessante por ter vários aspectos bastante semelhantes ao desta tese de doutorado, mas que não foi citado anteriormente por não tratar especificamente do assunto relacionado à localização de faltas. Os autores de [41] coletam dados do sistema de distribuição usando PMUs dispersas ao longo de todo o sistema, reduzindo a sua dimensão usando *auto-encoders*, para assim treinar um sistema inteligente com o objetivo de classificar possíveis problemas em equipamentos do sistema elétrico, como por exemplo falha em capacitores ou mal funcionamento de reguladores de tensão. Os resultados obtidos pelos autores foram bastante satisfatórios. Embora [41] não seja focado em localização de faltas, a forma de coleta e redução de dimensões dos dados caracteriza um procedimento bastante semelhante ao utilizado nesta tese de doutorado, o que indica que este procedimento pode ter grande parcela de contribuição para a obtenção de bons resultados.

Vale a pena reforçar que a presente tese é inovadora pois utiliza um sistema de inferência *fuzzy* para estimar grandezas relacionadas ao método da impedância aparente e assim poder localizar a falta, utilizando, para isto, apenas medições de tensão como entradas. Espera-se que os níveis de acerto se aproximem ou ultrapassem os níveis registrados na literatura atual.

3 O SISTEMA DE INFERÊNCIA *FUZZY* MULTICAMADAS

3.1 Introdução

Este capítulo trata do Sistema de Inferência *Fuzzy* (SIF) multicamadas que será utilizado para localizar faltas em um sistema de distribuição. Porém, antes de descrever o funcionamento do SIF multicamadas, cabe explicar brevemente a maneira que um SIF tradicional trabalha.

Os SIFs armazenam as informações a respeito das estratégias de solução de um determinado problema em um conjunto de regras e variáveis linguísticas. Por este motivo, geralmente, a interpretação da solução dos problemas feita por um ser humano acontece de forma bastante natural quando o problema é resolvido por meio de um SIF. Além disto, SIFs são capazes de manipular dados carregados com grande grau de incerteza, ou seja, podem analisar dados qualitativamente por meio de funções de pertinência [42].

Para o correto funcionamento de um SIF, ou seja, para que ele seja capaz de capturar um conjunto de dados de um meio externo e obter uma saída coerente, existe uma série de processos que precisam ser realizados ordenadamente. O primeiro deles é chamado de fuzzificação, que é a transformação dos dados de entrada em conjuntos *fuzzy*. Fuzzificar determinado dado significa transformar seu valor numérico (quantitativo) em um conceito linguístico (qualitativo), por meio de funções de pertinência definidas em um universo de discurso [43]. Com isto, as incertezas inerentes à mensuração deste dado podem ser, de certa forma, desprezadas, já que o conceito linguístico associado a cada função de pertinência trata de maneira semelhante faixas relativamente amplas de valores numéricos [44].

Para exemplificar e melhor explicar um SIF, que é a ferramenta de estimação empregada neste trabalho, será usado um exemplo de [43]. Na Figura 3-1 está ilustrada a partição *fuzzy* de uma variável linguística representando a temperatura, dividida em cinco conceitos linguísticos: muito baixa, baixa, confortável, alta e muito alta. Cada um destes conceitos é representado por uma função de pertinência. A quantidade destas funções e seu formato são parâmetros que precisam ser definidos em um SIF.

Figura 3-1 – Exemplo de fuzzificação dos dados de temperatura (adaptado de [43]).

De posse das entradas fuzzificadas, pode-se realizar o segundo processo *fuzzy*, que é denominado inferência. A inferência é responsável pela associação das funções de pertinência das entradas a regras linguísticas do tipo "se – então", cujos consequentes são as saídas do sistema. Sejam, por exemplo, duas entradas, a primeira a temperatura e segunda a variação de temperatura em uma sala, e uma saída correspondendo à potência de um aquecedor presente nesta sala. Uma típica regra *fuzzy* seria: Se (temperatura é baixa) e (variação de temperatura é pouco negativa) – então (potência do aquecedor é média) [43].

De fato, expressões linguísticas como a anterior, que envolvem conceitos qualitativos, geralmente são mais inteligíveis ao ser humano que equações com termos quantitativos. Porém, para que um SIF possa atuar tão bem quanto uma ferramenta quantitativa, é preciso criar uma base de regras *fuzzy* que contenha as mais importantes ou senão todas as combinações entre as funções de pertinência das entradas. Portanto, a quantidade de regras *fuzzy* que forma a base de regras também é um parâmetro a ser ajustado em um SIF. A Tabela 3-1 exibe um conjunto de regras *fuzzy* criado para controlar o aquecedor do exemplo dado anteriormente [43].

Tabela 3-1 – Conjunto de regras *fuzzy* (adaptado de [43]).

Variação Temp. Temp.	Muito negativa	Pouco negativa	Zero	Pouco positiva	Muito positiva
Muito baixa		Potência alta	Potência alta	Potência média	Potência média
Baixa	Potência alta	Potência média	Potência média	Potência baixa	Potência baixa
Confortável		Potência média	Potência baixa	Potência baixa	
Alta		Potência baixa	Potência baixa	Potência baixa	
Muito alta	Potência média	Potência baixa	Potência baixa		

Uma vez que as entradas foram fuzzificadas e associadas à saída por meio de regras de inferência *fuzzy*, poder-se-ia pensar que já seria possível obter a saída do SIF. Porém, antes disso, é preciso realizar o processo de agregação das regras *fuzzy*. Observando a Figura 3-1, percebe-se que alguns valores de temperatura podem pertencer a mais de um conjunto *fuzzy*, ou seja, podem ser descritos por mais de uma função de pertinência. Isto significa que pode acontecer de mais de uma regra *fuzzy* ser ativada ao mesmo tempo para um mesmo conjunto de valores de dados de entrada. A temperatura aos 22 °C, por exemplo, pode ser "confortável" com pertinência 0,4 e "alta" com pertinência 0,3, o que ativaria duas regras com consequências diferentes caso a variação de temperatura fosse "pouco negativa", com pertinência 1,0 [43].

Quando isto acontece, nenhuma das regras deve ser descartada. Pelo contrário, todas as consequências devem ser agregadas para formar uma região *fuzzy* de saída do SIF. Existem vários métodos de agregação, podendo-se considerar sua escolha outro parâmetro do SIF a ser definido. A Figura 3-2 ilustra o resultado obtido pelo método máximo-mínimo, regido pela equação (3-1), aplicado ao caso das duas regras ativadas no exemplo anterior. A equação abrange todo o universo de discurso da saída [43].

$$\mu_S = \max \left\{ \min \left[\max(\mu_{E1}^{(R1)}, \mu_{E2}^{(R1)}), \mu_S^{(R1)} \right], \min \left[\max(\mu_{E1}^{(R2)}, \mu_{E2}^{(R2)}), \mu_S^{(R2)} \right] \right\} \quad (3-1)$$

sendo:

- μ_S a pertinência da região *fuzzy* de saída;
- μ_{Ei}^{Rj} a pertinência da i-ésima entrada na j-ésima regra ativada;
- μ_S^{Rj} os valores da função de pertinência do consequente da j-ésima regra ativada.

Figura 3-2 – Exemplo de agregação de duas regras *fuzzy*. Em cinza está a região *fuzzy* de saída obtida (adaptado de [43]).

Depois da agregação, tem-se uma região *fuzzy* que representa a combinação de todas as regras *fuzzy* ativadas por determinado conjunto de entrada de dados. Porém, assim como as entradas vieram de um ambiente não-*fuzzy*, a saída será exportada a um ambiente não-*fuzzy*, e por isso ela deve ser um valor numérico, e não uma região *fuzzy*. Este valor numérico pode significar a potência do aquecedor a ser ajustada no exemplo dado anteriormente. Para obter este valor, executa-se o último processo de um SIF, a defuzzificação.

Dentre os métodos de defuzzificação, o mais comum é o centro de área. Calcula-se em que posição do eixo horizontal está o centro de área da região *fuzzy* obtida com a agregação e este valor será a saída numérica do SIF. Definir o método de defuzzificação também faz parte da parametrização do SIF.

O SIF empregado neste trabalho, desenvolvido em [5], realiza os processos de fuzzificação das entradas do sistema, inferência das regras associadas a elas, agregação destas regras e a posterior defuzzificação do resultado da agregação de maneira sequencial, distinta e claramente definida. Por este motivo, a interpretação de um SIF por meio de um modelo multicamadas é compreensível. Cada camada pode realizar um ou mais processos diferentes, a fim de transformar um conjunto de entradas em uma saída desejada. Neste SIF, propõe-se utilizar três camadas: a de entrada, a de inferência e a de saída.

3.2 Camada de entrada

A camada de entrada conecta os dados de entrada, advindos do meio externo, ao SIF, e ao mesmo tempo os fuzzifica. Dessa forma, o grau de pertinência de cada entrada associado a um conceito linguístico, ou conjunto *fuzzy*, é definido pela camada de entrada.

Podem-se usar tantos conjuntos *fuzzy* por entrada quanto necessário para defini-la. Seja um SIF com uma entrada e com N funções de pertinência associadas a ela; a saída Y da camada de entrada do SIF será um vetor que contém as funções de pertinência $p_k(x)$ definidas para a entrada x , como na equação (3-2).

$$Y(x) = \begin{bmatrix} p_1(x) \\ p_2(x) \\ \vdots \\ p_N(x) \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

Pode-se expandir este conceito de fuzzificação para o caso de um SIF com mais dados de entrada apenas concatenando os diversos vetores-coluna referentes a cada entrada. Para o caso de um SIF com duas entradas e com três funções de pertinência por entrada, por exemplo, como na Figura 3-3, o vetor de saída da camada de entrada seria como o da equação (3-3).

Figura 3-3 – Representação das entradas do SIF multicamadas [5].

$$Y(x) = [p_1^{(1)}(x_1) \quad p_2^{(1)}(x_1) \quad p_3^{(1)}(x_1) \quad p_1^{(2)}(x_2) \quad p_2^{(2)}(x_2) \quad p_3^{(2)}(x_2)]^T \quad (3-3)$$

As funções de pertinência das entradas podem ser definidas por meio de qualquer função, não necessariamente as triangulares e trapezoidais como as da Figura 3-3. A única restrição é que elas estejam definidas no intervalo fechado $[0, 1]$. Porém, aconselha-se utilizar funções de pertinência simples, a fim de aumentar a velocidade de processamento e reduzir o uso de memória computacional.

3.3 Camada de inferência

A camada de inferência das regras *fuzzy* recebe os dados de entrada já fuzzificados e os combina entre si de acordo com uma base de regras definida. Esta base de regras é onde fica armazenado parte do conhecimento sobre as estratégias para a solução de determinado problema, sendo, portanto, fundamental criar uma base de regras que seja coerente com o tal.

Além da criação da base de regras, na segunda camada do SIF multicamadas acontece a ponderação destas regras. Assim, podem-se valorizar aquelas regras que mais influenciam na solução do problema. Esta ponderação acontece segundo a equação (3-4).

$$R_i(Y(x)) = w_i r_i(Y(x)) \quad (3-4)$$

sendo:

- $R_i(\cdot)$ a função que representa o valor ponderado da i -ésima regra *fuzzy*;
- w_i o fator de ponderação da i -ésima regra *fuzzy*;
- $r_i(\cdot)$ o valor da i -ésima regra *fuzzy*.

3.4 Camada de saída

Na camada de saída são realizados os processos de agregação das regras *fuzzy* e de defuzzificação, que são os dois últimos processos restantes para que se obtenha a saída do SIF. Além disso, é na terceira camada do SIF multicamadas que ficam armazenadas as funções de pertinência das saídas.

Escolher corretamente qual método de agregação e de defuzzificação utilizar é importante por dois motivos. Em primeiro lugar, a região *fuzzy* de resposta deve ser capaz de inferir adequadamente o conhecimento contido na base de regras, e em segundo lugar, o SIF deve ser capaz de traduzir esta região para um valor não-*fuzzy* que corresponda à realidade do problema. Além disso, os métodos não podem comprometer a velocidade de processamento.

Como a camada de saída trata regiões *fuzzy*, sua formulação é semelhante ao da camada de entrada, que também trata este tipo de região.

Para resumir e ilustrar o que foi descrito acima, a Figura 3-4 exibe um esquemático do SIF multicamadas com duas entradas e três regras ativadas.

Figura 3-4 – SIF multicamadas [5].

3.5 Ajuste estrutural

O número de regras *fuzzy* e seu conteúdo linguístico, que formam a base de regras do SIF, são parâmetros a ser definidos. Encontrar a melhor dentre todas as bases não é uma tarefa fácil, já que existe um enorme número de possibilidades, dependendo da quantidade de entradas e de funções de pertinência de cada uma delas.

É conveniente, então, que seja realizada a busca pela melhor base de regras em determinado espaço válido. O algoritmo de busca utilizado, baseado em [45], visa minimizar uma função custo explicitada em termos do erro quadrático médio entre a saída obtida e a desejada.

Entretanto, a superfície formada pela função custo pode conter vários mínimos locais, o que, em muitos casos, pode atrapalhar a busca pelo mínimo global. Assim sendo, faz-se necessário que uma estratégia de busca local aconteça depois de efetuada a busca global.

O algoritmo da busca pela melhor base de regras está exposto na Figura 3-5. A busca global, que é a primeira etapa deste algoritmo, consiste em sortear várias bases de regras e selecionar aquela que apresenta o menor custo. Em seguida, realiza-se uma busca local em torno da vizinhança desta base escolhida, a fim de encontrar alguma outra base com custo ainda menor. Por fim, a base de regras do SIF será aquela que apresentar o menor custo depois de realizadas todas as iterações da primeira e da segunda etapas.

```

Inicializar o sistema fuzzy
R1 ← Selecionar uma base de regras aleatória
Contador ← 0
REPITA
  R2 ← Selecionar uma base de regras aleatória
  SE custo(R2) < custo(R1)
  ENTÃO
    R1 ← R2
    Contador ← Contador + 1
  FIM SE
ATÉ Contador muito grande

Contador ← 0
REPITA
  R2 ← Inserir uma pequena perturbação em R1
  SE custo(R2) < custo(R1)
  ENTÃO
    R1 ← R2
    Contador ← Contador + 1
  FIM SE
ATÉ Contador muito grande

```

Figura 3-5 - Algoritmo de extração das regras *fuzzy* (adaptado de [7]).

3.6 Ajuste paramétrico

Dividir um SIF em camadas, cada qual realizando um processo diferente, faz com que haja em cada camada parâmetros livres referentes aos processos por elas desempenhados. Na camada de entrada há os parâmetros das funções de pertinência das entradas, enquanto na camada de inferência as ponderações das regras *fuzzy* são os parâmetros. Já na camada de saída, existem os parâmetros dos conjuntos *fuzzy* do espaço de saída.

Assim como no caso do ajuste estrutural, o ajuste paramétrico também tem por objetivo minimizar uma função custo. Considerando um conjunto de ajuste de entradas e saídas $\{x, y\}$ fixo durante todo o ajuste paramétrico, pode-se escrever esta função custo ξ responsável pela sintonia dos parâmetros livres das três camadas $\{h^{(1)}, h^{(2)}, h^{(3)}\}$ no mapeamento *fuzzy* $g: x \rightarrow y$ em função deles, como na equação (3-5).

$$\xi_g = \xi(h^{(1)}, h^{(2)}, h^{(3)}) \quad (3-5)$$

Assim, depois de minimizado ξ_g , tem-se os parâmetros que, juntamente com a base de regras encontrada por meio do algoritmo da Figura 3-5, otimizam o SIF multicamadas. Esta minimização de ξ_g , que é o passo final para o ajuste completo do SIF, pode ser considerada como um caso de otimização irrestrita e, portanto, pode ser resolvida pelo método do gradiente descendente.

Para esclarecer o processo de ajuste paramétrico, considera-se como exemplo um SIF que contém uma entrada com duas funções de pertinência gaussianas, três regras *fuzzy* e uma saída também com duas funções de pertinência gaussianas. Assim, os parâmetros $\{h^{(1)}, h^{(2)}, h^{(3)}\}$, referentes respectivamente às camadas de entrada, de inferência e de saída do SIF, são dados por:

$$h^{(1)} = [\mu_1^{(e)} \quad \sigma_1^{(e)} \quad \mu_2^{(e)} \quad \sigma_2^{(e)}]^T \quad (3-6)$$

$$h^{(2)} = [w_1 \quad w_2 \quad w_3]^T \quad (3-7)$$

$$h^{(3)} = [\mu_1^{(s)} \quad \sigma_1^{(s)} \quad \mu_2^{(s)} \quad \sigma_2^{(s)}]^T \quad (3-8)$$

sendo:

- $\mu_i^{(e)}$ a média da i-ésima função de pertinência da entrada;
- $\sigma_i^{(e)}$ o desvio padrão da i-ésima função de pertinência da entrada;
- w_i o fator de ponderação da i-ésima regra *fuzzy*;
- $\mu_i^{(s)}$ a média da i-ésima função de pertinência da saída;
- $\sigma_i^{(s)}$ o desvio padrão da i-ésima função de pertinência da saída.

Como cada camada do SIF tem processos distintos, e como o ajuste dos parâmetros de um destes processos pouco influencia os outros, é possível realizar o ajuste paramétrico do SIF camada a camada. Dessa forma, para exemplificar, na equação (3-9) aplica-se o método do gradiente descendente na camada de inferência,

$$h^{(2)}(k) = h^{(2)}(k-1) + \eta \cdot \nabla \xi \left(h^{(2)}(k-1) \right) \quad (3-9)$$

sendo η a taxa de aprendizagem e

$$\nabla \xi(h^{(\cdot)}) = \left[\frac{\partial \xi}{\partial h_1^{(\cdot)}} \quad \frac{\partial \xi}{\partial h_2^{(\cdot)}} \quad \dots \quad \frac{\partial \xi}{\partial h_n^{(\cdot)}} \right]^T \quad (3-10)$$

sendo:

- $h_i^{(\cdot)}$ o i-ésimo elemento do vetor $h^{(\cdot)}$;
- n o número de elementos do vetor $h^{(\cdot)}$.

Como a expressão analítica do gradiente é difícil de ser obtida, utiliza-se sua aproximação numérica por meio do método de equações às diferenças, que está formulado na equação (3-11) [46].

$$\frac{\partial \xi}{\partial h_i^{(\cdot)}} \cong \frac{\xi(h^{(\cdot)} + \rho \cdot e_i) - \xi(h^{(\cdot)})}{\rho} \quad (3-11)$$

sendo ρ um valor muito pequeno e $e_i = [0 \quad 0 \quad \dots \quad 1 \quad \dots \quad 0]^T$ com o elemento não nulo ocupando a posição i .

Realizando este processo de otimização em todas as três camadas do SIF pode-se minimizar a função custo ξ_g . A Figura 3-6 ilustra este processo de otimização aplicado à camada de inferência. O algoritmo exposto é similar para as demais camadas.

```

Inicializar os parâmetros livres do sistema fuzzy multicamadas
Codificar os parâmetros em  $h^{(1)}$ ,  $h^{(2)}$  e  $h^{(3)}$ 
Deixar  $h^{(1)}$  e  $h^{(3)}$  fixos
 $\acute{E}poca \leftarrow 0$ 
REPITA
  PARA todos os padrões de sintonia FAÇA
    Propagar padrão camada a camada e obter saída  $y_k$ 
    Guardar o erro quadrático do respectivo padrão
    Calcular  $\nabla \xi(h^{(2)})$ 
    Atualizar  $h^{(2)}$ 
  FIM PARA
  Obter o erro quadrático médio  $\xi_g$ 
   $\acute{E}poca \leftarrow \acute{E}poca + 1$ 
ATÉ ( $\xi_g$  muito pequeno) OU ( $\acute{E}poca$  muito grande)

```

Figura 3-6 - Algoritmo de ajuste paramétrico (adaptado de [7]).

Para finalizar os ajustes dos parâmetros livres das camadas do SIF, ainda se faz necessário definir os parâmetros referentes aos operadores *fuzzy*, às entradas, à base de regras e à saída. Define-se, portanto, o operador "ou probabilístico" para realizar a agregação e o método do centro de área [47] para realizar a defuzzificação. Todas as funções de pertinência são do tipo gaussiana assimétrica, pois são diferenciáveis em todo o seu domínio. O número de regras existente na base de regras será um parâmetro escolhido no decorrer do treinamento.

4 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO UTILIZANDO SISTEMAS *FUZZY*

4.1 Introdução

Após o treinamento do SIF segundo os algoritmos explanados no Capítulo 3, ele será capaz de fornecer como saída os dados da grandeza que se deseja estimar para realizar a localização de uma falta. Para efeito de comparação de resultados, nesta tese a distância da falta será obtida de duas formas diferentes, ambas no mesmo sistema de distribuição. A primeira forma será treinando o SIF para que ele retorne como saída os valores de impedância de sequência zero e positiva, de forma que se possa encontrar a impedância aparente e assim calcular a distância da falta segundo a equação (2-2). A segunda forma de se obter a distância é usar diretamente o valor da distância da falta como saída do SIF.

Para qualquer dos casos acima, serão fornecidos como entradas ao SIF os dados de tensão pós-falta simulados em um alimentador de um sistema de distribuição real. No total, existem 25 tipos de dados relacionados a tensões que são candidatos a serem entradas do SIF, que são o módulo, parte real e parte imaginária das tensões de fase, de linha e de sequência, listados a seguir: $V_A, V_B, V_C, V_{AB}, V_{BC}, V_{CA}, V_0, V_1, V_2, V_{Br}, V_{Bi}, V_{Cr}, V_{Ci}, V_{ABr}, V_{ABi}, V_{BCr}, V_{BCi}, V_{CAr}, V_{CAi}, V_{0r}, V_{0i}, V_{1r}, V_{1i}, V_{2r}, V_{2i}$. Considerando-se que a falta ocorre na fase A, e usando esta fase como referência, seu módulo é igual à sua parte real e sua parte imaginária é nula. Por isto, não é necessário tornar candidatas as partes real e imaginária desta fase, V_{Ar} e V_{Ai} .

Com a medição dos módulos das tensões de fase e linha consegue-se calcular a parte real e imaginária das tensões de fase, e, conseqüentemente, todas as outras tensões candidatas a entradas do SIF, segundo o equacionamento em (4-1) exemplificado para a obtenção da parte real e imaginária da tensão na fase B. O sinal negativo antes da raiz quadrada na expressão de V_{Bi} deve-se ao fato de o fasor da tensão B estar localizado no terceiro quadrante. No cálculo de V_{Ci} , este sinal é positivo.

Para calcular as partes reais e imaginárias das tensões de sequência, usa-se o método das componentes simétricas [10]. Embora seja possível medir ou calcular todas as tensões citadas, inserir todas elas como entradas do SIF seria algo extremamente custoso computacionalmente. Assim, adapta-se a metodologia desenvolvida em [8] para a seleção de entradas de um sistema inteligente, explicada na próxima seção.

$$\begin{aligned}
V_*^2 &= V_{*r}^2 + V_{*i}^2 \\
V_{AB}^2 &= V_{ABr}^2 + V_{ABi}^2 = (V_A - V_{Br})^2 + V_{Bi}^2 \\
V_{AB}^2 &= V_A^2 + \underbrace{V_{Br}^2 + V_{Bi}^2}_{V_B^2} - 2V_A V_{Br} \\
V_{AB}^2 &= V_A^2 + V_B^2 - 2V_A V_{Br} \\
V_{Br} &= \frac{V_A^2 + V_B^2 - V_{AB}^2}{2V_A} \\
V_{Bi} &= -\sqrt{V_B^2 - V_{Br}^2}
\end{aligned} \tag{4-1}$$

4.2 Metodologia para seleção das entradas do sistema *fuzzy*

A fim de encontrar um conjunto adequado de entradas para que um SIF localize uma falta fase-terra com erro reduzido, a metodologia de seleção de entradas propõe que sejam escolhidas as entradas do sistema uma após outra, seguindo critérios de seleção. Estes critérios visam selecionar entradas que não contenham informações redundantes entre si sobre o comportamento da falta, e que também não contenham informações descorrelacionadas com o ponto de falta. Dessa forma, o treinamento do SIF acontece mais rapidamente.

Assim, a primeira entrada do SIF de localização é selecionada por meio do cálculo da correlação dos vetores com dados de treinamento, que são as 25 tensões, com o vetor com dados referentes à saída do SIF, que neste trabalho será um vetor de impedância de sequência zero, positiva, ou diretamente a distância da falta. A tensão que apresentar maior correlação com a saída será escolhida como a primeira entrada do SIF. No MATLAB, *software* utilizado para implementar as simulações deste trabalho, a função que realiza este cálculo denomina-se “corr()”.

Já a segunda variável a compor as entradas do SIF deve ser aquela que melhor se correlacionar com o vetor normal à projeção do vetor correspondente à primeira entrada no vetor de saída. O cálculo do vetor normal, d_n , à projeção do vetor correspondente à primeira entrada, V_{E1} , no vetor de saída a ser estimado Z_S pode ser feito segundo a equação (4-2).

$$d_n = V_{E1} - \frac{\langle Z_S | V_{E1} \rangle}{\|Z_S\|^2} Z_S \tag{4-2}$$

sendo $\langle \cdot | \cdot \rangle$ o produto escalar entre os argumentos e $\|\cdot\|^2$ a norma euclidiana. Este cálculo seleciona uma segunda tensão que não sofre tanta influência da primeira entrada escolhida, de forma que haja mais diversidade de informação inserida no SIF, mas que ainda está bastante correlacionado com a primeira entrada, o que melhora o treinamento do SIF e a estimação da impedância ou da distância. Para ilustrar o que representa cada termo da equação (4-2), tem-se a Figura 4-1.

Figura 4-1 – Representação dos vetores da equação (4-2).

Conhecendo as duas primeiras entradas do SIF, pode-se prosseguir para o processo iterativo de escolha das próximas entradas. Todas as entradas a partir da terceira são obtidas por meio da correlação dos dados de treinamento com o erro de estimação obtido com as entradas até então selecionadas. Este procedimento visa inserir ao SIF informações sobre quão errada está sua estimação com o conjunto disponível, para desta forma reduzir o erro de estimação. A Figura 4-2 detalha todo o processo de seleção de variáveis, que se encerra ao mesmo tempo em que conclui o treinamento do SIF.

```

V ← Dados de entrada de treinamento do SIF (25 tensões)
ZS ← Dados de saída de treinamento do SIF (impedância de sequência zero, positiva,
ou distância da falta)
Calcular correlação entre V e ZS
VE1 ← a tensão com a maior correlação entre V e ZS
Entrada1 ← VE1
Calcular dn
Correlacionar dn com V
VE2 ← a tensão com a maior correlação entre dn e V
Entrada2 ← VE2
Definir número de regras do SIF
i ← 3
REPITA
  Treinar o SIF para realizar uma estimação com as entradas já selecionadas
  Obter o erro de estimação para cada amostra dos dados de teste
  Correlacionar este erro com V
  VEi ← a tensão com a maior correlação entre o erro e V
  Entradai ← VEi
  i ← i + 1
ATÉ (i > valor máximo de entradas estipulado) OU (erro muito pequeno)

```

Figura 4-2 – Algoritmo de seleção de entradas.

4.3 Modelagem do sistema de distribuição

Os dados de treinamento e teste foram obtidos em simulações de diversas faltas em um sistema de distribuição real. O cenário onde acontecem as simulações de faltas desta tese está situado em Biritiba-Mirim, no sudeste do estado de São Paulo. Ele é um dos alimentadores da subestação localizada na Rodovia SP-098 Dom Paulo Rolim Loureiro (Mogi-Bertioga).

Este cenário está ilustrado na Figura 4-3. A subestação é representada pela estrela verde no centro da imagem, enquanto o alimentador utilizado para as simulações está identificado na cor azul. Já os círculos azuis representam os nós do sistema, ao passo que os pontos pretos dentro dos círculos representam transformadores. A distância percorrida pela rede elétrica entre a subestação e o último transformador é de 34,5 km. Nas simulações, considerou-se cada transformador como sendo um ponto de medição de tensão.

Os dados gerados em cada simulação contêm a tensão pós-falta do lado de média de cada transformador do alimentador estudado, havendo um total de 1600 nós e 505 transformadores. Além das tensões, para cada falta simulada armazena-se também os valores de impedância de sequência zero e positiva entre o transformador e o ponto de falta, bem como a distância correspondente.

Vale lembrar que, na prática, a tensão do lado de média pode ser medida por meio de uma PMU instalada na baixa tensão, sendo posteriormente rebatida para a média considerando a modelagem do transformador [6].

Algumas considerações foram feitas na aquisição dos dados deste estudo. A tensão nominal entre fases é de 13,8 kV. Foi considerado que antes da falta as tensões têm mesmo módulo e são defasadas de 120° . A falta é franca e da fase A à terra. O sistema opera sem cargas e não há presença de geração distribuída.

Por fim, uma última consideração a respeito da área vermelha da Figura 4-3. Esta área corresponde a outros cinco alimentadores da subestação, mas não foi considerada para a obtenção dos resultados deste trabalho, mesmo porque, devido à presença da proteção do sistema elétrico, uma falta que ocorre em um alimentador não é percebida nos demais. Dessa forma, caso deseje-se implementar a localização de faltas para todos os alimentadores da subestação, bastaria repetir os procedimentos e metodologias aplicados no alimentador azul para cada alimentador da área vermelha.

Figura 4-3 – Sistema real usado nas simulações.

4.4 Resultados da aplicação da metodologia desenvolvida no cenário estudado

Para treinar o SIF com os dados selecionados, foram simuladas 1600 faltas da fase A à terra, sendo uma em cada barra do alimentador azul da Figura 4-3. Para cada uma delas, armazenou-se todos os 25 tipos de dados de média tensão dos 505 transformadores, além das impedâncias de sequência zero e positiva vista a partir deles, e a distância entre cada transformador e a falta. Dentre todos os mais de 800.000 conjuntos de dados gerados, foram escolhidos aleatoriamente 50.000 deles para o treinamento do sistema, e mais 50.000 para testes.

Os treinamentos foram realizados segundo a metodologia apresentada e, após alguns ensaios testando-se diversas combinações de números de entrada e de regras, percebeu-se que o melhor resultado foi obtido quando há 5 entradas e 12 regras. Com estas configurações, três SIFs foram treinados: um para estimar a impedância de sequência zero, outro para a de sequência positiva, e um terceiro para estimar diretamente a distância da falta e comparar o resultado com o que se obtém dos dois primeiros SIFs.

4.4.1 Estimação da impedância de sequência zero

As tensões selecionadas como entradas para o primeiro SIF foram, em ordem, V_A , V_{Ci} , V_{Bi} , V_{ABi} e V_{0i} . As regras e funções de pertinência das entradas e da saída estão expostas na Figura 4-4, enquanto que o resultado da estimação de Z_0 pode ser visto na Figura 4-5. A reta preta indica o resultado ideal ($y = x$), enquanto a equação obtida ($y = 0,9701x + 0,416$) representa a reta amarela, que é a reta que melhor se encaixa nos pontos obtidos pelo método dos mínimos quadrados. O erro com média mais próxima a zero acontece quando Z_0 tem valor de 13,91 Ohm, que é o ponto onde ambas as retas se interceptam. Este valor está localizado aos 25,36% de toda a faixa de valores possíveis de Z_0 [0,0053 , 54,852].

Já a Figura 4-6 mostra o histograma comparando a quantidade de amostras contendo os valores esperados e estimados, enquanto a Figura 4-7 mostra o histograma do erro de estimação. O erro absoluto médio percentual da estimação de Z_0 é de 6,34%.

Figura 4-4 – Regras e funções de pertinência do SIF que estima Z_0 . (Entradas: V_A , V_{Ci} , V_{Bi} , V_{ABi} e V_{0i}).

Figura 4-5 – Comparação entre valor esperado e estimado de Z_0 .

Figura 4-6 – Histograma com quantidades de amostras de Z_0 .

Figura 4-7 – Histograma do erro da estimação de Z_0 (variância = 0,4265).

4.4.2 Estimação da impedância de sequência positiva

Já para estimar Z_1 , as tensões selecionadas segundo a metodologia foram V_A , V_{1i} , V_{Bi} , V_0 e V_{CA} . A configuração de regras e funções de pertinência do SIF estão na Figura 4-8. Os resultados obtidos para os valores de Z_1 estão na Figura 4-9. Como anteriormente, a reta preta ($y = x$) ilustra o caso ideal, e a reta amarela, com equação ($y = 0,95906x + 0,18439$) é a que melhor se encaixa nos pontos estimados. Para Z_1 , o ponto de intersecção das retas é quando o seu valor é de 4,50 Ohm, que está localizado aos 21,33% de toda a faixa de valores possíveis de Z_1 [0,0020 , 21,1076].

O histograma comparando a quantidade de amostras contendo os valores esperados e estimados de Z_1 está na Figura 4-10, enquanto a Figura 4-11 mostra o histograma do erro de estimação. O erro absoluto médio percentual para a estimação de Z_1 é de 6,62%.

Figura 4-8 – Regras e funções de pertinência do SIF que estima Z_1 . (Entradas: V_A , V_{1i} , V_{Bi} , V_0 e V_{CA}).

Figura 4-9 – Comparação entre valor esperado e estimado de Z_1 .

Figura 4-10 – Histograma com quantidades de amostras de Z_1 .

Figura 4-11 – Histograma do erro da estimaco de Z_1 (variância = 0,1625).

4.4.3 Cálculo da distância da falta com base na estimaco das impedâncias de seqüência

Com os resultados de ambas as estimaces anteriormente apresentadas  possível calcular a distância estimada de cada ponto de medio  falta, segundo a equaco (2-2). O fator de proporcionalidade entre D e Z_{ap} , para o caso estudado,  de 0,4 km/Ohm.

A Figura 4-12 compara a distância estimada com a real, e o ponto de cruzamento entre a reta preta ideal ($y = x$) e a reta amarela dos mínimos quadrados ($y = 0,9795x + 0,31008$)  15,13 km, que está aos 43,85% da faixa de valores de distância [0,0065 , 34,49].

Já a Figura 4-13 mostra o histograma comparando a quantidade de amostras estimadas e esperadas referentes  distância da falta, e a Figura 4-14 mostra o histograma do erro de estimaco da distância quando calculada por meio da estimaco das impedâncias de seqüência. O erro absoluto médio percentual para a distância calculada pela equaco (2-2)  de 6,83%.

Vale observar que o ponto onde as retas se cruzam na Figura 4-12  significativamente diferente do ponto que se esperaria encontrar caso a distância fosse calculada com os pontos de menor erro de Z_0 e Z_1 . Usando $Z_0 = 13,91$ e $Z_1 = 4,50$, a distância com menor erro deveria ser de 9,17 km, que estaria aos 26,57% da faixa de valores possíveis de distância.

Figura 4-12 – Comparação entre valor esperado e estimado da distância da falta, quando calculada por meio da estimação das impedâncias.

Figura 4-13 – Histograma com quantidades de amostras da distância da falta, quando calculada por meio da estimação das impedâncias.

Figura 4-14 – Histograma do erro da estimação da distância da falta, quando calculada por meio da estimação das impedâncias (variância = 0,2370).

4.4.4 Estimação diretamente da distância da falta

Ao treinar um SIF para estimar diretamente a distância da falta, as tensões de entrada selecionadas segundo a metodologia apresentada na Seção 4.2 foram V_A , V_{Ci} , V_{Bi} , V_{CA} e V_0 . As regras e funções de pertinência das entradas e da saída, obtidas por meio da metodologia exposta no Capítulo 3 estão na Figura 4-15, e o resultado da estimação da distância da falta pode ser visto na Figura 4-16. Novamente, a reta preta indica o resultado ideal ($y = x$), enquanto a reta amarela ($y = 0,96753x + 0,3013$) representa a reta dos mínimos quadrados. Elas se cruzam na distância de 9,28 km, localizada aos 26,89% da faixa de valores possíveis [0,0065 , 34,49].

A Figura 4-17 exibe o histograma que compara a quantidade de amostras de valores esperados e estimados, enquanto que a Figura 4-18 ilustra o erro de estimação, também por meio de histograma. O erro absoluto médio percentual para a distância, quando estimada diretamente por meio do SIF, é de 6,16%.

Figura 4-15 – Regras e funções de pertinência do SIF que estima a distância da falta. (Entradas: V_A , V_{Ci} , V_{Bi} , V_{CA} e V_0).

Figura 4-16 – Comparação entre valor esperado e estimado da distância da falta, quando obtida diretamente por meio do treinamento do SIF.

Figura 4-17 – Histograma com quantidades de amostras da distância da falta, quando obtida diretamente por meio do treinamento do SIF.

Figura 4-18 – Histograma do erro da estimação da distância da falta, quando obtida diretamente por meio do treinamento do SIF (variância = 0,2868).

4.4.5 Comparação dos resultados obtidos

A distância da falta foi obtida de duas maneiras diferentes, ambas seguindo a mesma metodologia de treinamento do SIF e a mesma metodologia de seleção de variáveis de entrada. Na primeira maneira, a distância foi encontrada pela composição das impedâncias de sequência zero e positiva, cada qual sendo a saída de um SIF. Na segunda maneira, a distância foi diretamente a saída do SIF. A comparação entre os resultados exibidos será feita em duas etapas. Primeiramente serão apresentadas as semelhanças e diferenças percebidas no que diz respeito aos três treinamentos do SIF e, posteriormente, serão comparados os resultados referentes aos dois valores obtidos para a distância da falta.

O conjunto de 50.000 dados aleatórios para treinamento do SIF foi o mesmo utilizado para os três treinamentos. Este conjunto é uma matriz que contém 28 colunas, sendo 25 delas as possíveis tensões de entrada, e três delas as possíveis saídas (impedância de sequência zero, impedância de sequência positiva e distância da falta). Cada treinamento visou, individualmente, a obtenção de uma saída diferente.

Em todos os treinamentos manteve-se a configuração do SIF: doze regras, cinco entradas, 100 épocas de treinamento para a definição da base de regras, 100 épocas para a perturbação nesta base de regras e 200 épocas para o ajuste paramétrico.

O erro absoluto médio percentual dos três treinamentos foi bastante próximo, na faixa dos 6,5%. O comportamento do erro de estimação também foi bastante semelhante nos três treinamentos. Para valores estimados próximos a zero, os erros foram sempre positivos, ou seja, o valor estimado foi maior que o esperado. Para valores estimados próximos ao valor máximo de cada grandeza, os erros foram sempre negativos. E por volta do primeiro quartil, ou seja, de 25% da faixa de valores de cada grandeza, encontrava-se o erro médio mais próximo de zero.

Nos três treinamentos, percebe-se que o SIF encontrou certa dificuldade em estimar valores próximos a zero. Pode-se notar este fato observando os histogramas com a quantidade de amostras esperadas e estimadas (Figura 4-6, Figura 4-10, Figura 4-13 e Figura 4-17). Nas primeiras faixas de valores dos histogramas, sempre há maior quantidade de dados esperados que estimados.

As entradas selecionadas para cada treinamento têm algumas peculiaridades interessantes. A primeira entrada sempre foi a tensão da fase faltosa. Já as demais foram variadas, mas o que chama a atenção é o fato de as entradas escolhidas para a estimação direta da distância da falta serem compostas em parte por entradas escolhidas para a estimação da impedância de sequência zero, e em outra parte por entradas escolhidas para a estimação da impedância de sequência positiva. Nenhuma entrada escolhida no terceiro treinamento foi inédita.

Passando para a comparação entre os valores de distância da falta, observa-se que os erros obtidos também foram bastante próximos. O erro absoluto médio percentual foi menor na estimação direta da distância da falta (6,16% contra 6,83%). Entretanto, a variância do erro da distância composta pelas impedâncias foi menor (0,2370 contra 0,2878 da distância obtida diretamente pelo SIF). De qualquer forma, para ambos os casos, o valor absoluto do erro dificilmente ultrapassa o valor de 0,5 km.

Por outro lado, houve bastante diferença quanto ao posicionamento do menor erro dentro da faixa possível de valores de distância. No caso da distância composta pelas impedâncias, o menor erro encontra-se na distância de 15,13 km, quase na metade da faixa possível de valores de distância (o alimentador tem 34,5 km de extensão). Mas quando a distância foi obtida diretamente pelo treinamento do SIF, o menor erro encontra-se a 9,28 km de distância, aproximadamente no primeiro quartil da faixa de valores.

4.5 Estudo de caso

Para finalizar o capítulo que discorre sobre os resultados, cabe ainda abordar um estudo de caso, exemplificando, ilustrando e descrevendo qual é a contribuição individual de diferentes medidores no momento da localização de uma falta. Isto será feito com base no SIF treinado para estimar diretamente a distância da falta, mas usando dados de uma falta que não havia sido empregada nem em seu treinamento nem em seu teste.

Na área ampliada mostrada na Figura 4-19, os medidores estão indicados por “O”, e o local da falta acusado por cada um deles está indicado por “X” na respectiva cor. O ponto exato da falta é o “X” vermelho. O procedimento para delimitar a região onde a falta está localizada pode ser realizado conforme a seguir.

Sabe-se, pela Figura 4-16, que medidores próximos à falta informam que ela está a uma distância maior do que o ponto correto da falta. Com isto, determina-se que o ponto exato da falta esteja no trecho entre “O” e “X” amarelos.

Em seguida, procura-se por medidores que estejam à distância aproximada de 9,28 km deste trecho onde possivelmente encontra-se a falta. Este valor de distância vem da equação da reta dos mínimos quadrados, também exibida na Figura 4-16. A indicação de um destes medidores, em verde, confirma que a falta realmente está no trecho inicialmente indicado, e está próxima ao “X” verde. Porém, não é possível afirmar se a falta está dentro ou fora do trecho entre “O” e “X” verdes, pois os erros nesta faixa de distância têm média zero.

Os medidores muito distantes, exemplificados por um medidor em roxo, acusam que o local da falta não pertence ao trecho inicialmente suspeito. Este fato também era esperado pois, ultrapassada a distância cujo erro médio é zero, os erros são mais negativos quanto maior a distância entre o medidor e a falta. Mesmo assim, o ponto de falta indicado pelo medidor roxo também é útil pois indica que a falta está fora do trecho entre “O” e “X” roxos.

Com este conjunto de informações, a falta pode ser localizada por meio de buscas dentro da região delimitada pelo “X” amarelo, “O” amarelo e “X” roxo, priorizando os entornos do local indicado pelo “X” verde. Embora a área já seja bastante reduzida se comparada à extensão total do alimentador, é possível reduzi-la ainda mais, sendo necessário apenas incorporar as respostas de uma quantidade maior de medidores ao procedimento descrito. Agregar uma maior quantidade de medidores à análise é especialmente importante em casos onde a falta ocorre próxima a bifurcações do sistema de distribuição, pois assim pode-se limitar a zona da falta em todas as direções.

Figura 4-19 – Estudo de caso exemplificando o procedimento de localização de falta.

5 CONCLUSÕES

Avaliando todos os resultados expostos, pode-se afirmar que o objetivo da tese foi alcançado satisfatoriamente. Usando-se como entradas exclusivamente dados de tensão pós-falta, o SIF foi capaz de ser treinado a ponto de acumular conhecimento e aprendizado suficientes a respeito do comportamento de um sistema de distribuição de energia quando ocorre uma falta fase-terra, e com isto localizá-la com grande exatidão.

Acrescenta-se, ainda, que o objetivo foi alcançado com sucesso de duas maneiras diferentes, já que as faltas puderam ser localizadas via estimação das impedâncias de sequência zero e positiva, ou diretamente via estimação da própria distância da falta. De ambas as formas, os erros de estimação estão dentro da faixa de erros encontrados na literatura.

A regularidade na magnitude do erro de estimação confirma que o SIF é capaz de estimar tipos diferentes de grandezas com a mesma eficácia. Esta capacidade é fruto da possibilidade de aprendizado do comportamento do sistema de distribuição. Durante seu treinamento, o SIF foi capaz de adaptar suas regras e funções de pertinência para cada tipo de grandeza estimada, levando em consideração as entradas que lhe foram fornecidas.

Vale lembrar que estas entradas foram subconjuntos com cinco diferentes tensões para cada grandeza estimada, que foram selecionadas segundo a metodologia exposta, dentre um total de 25 possíveis tipos de tensão. Os resultados obtidos com a utilização de cada um destes subconjuntos comprovam que a metodologia para a seleção de variáveis de entrada é capaz de compactar sem prejuízos as informações essenciais presentes no conjunto todo, de modo que o SIF conseguisse estimar as grandezas necessárias com menor esforço computacional.

Além de facilitar o treinamento do SIF por meio da redução de dimensões do conjunto de entradas, a metodologia de seleção de variáveis também se mostrou coerente com a teoria de sistemas elétricos de potência, por dois motivos. Em primeiro lugar, a primeira entrada selecionada sempre foi a mesma para os três treinamentos: a tensão na fase faltosa. Isto mostra a íntima relação entre a distância da falta e a tensão na fase em que ela ocorre. Em segundo lugar, o fato de as entradas selecionadas para estimar diretamente a distância de falta não terem sido inéditas, ou seja, serem uma composição entre as entradas selecionadas para a estimação das impedâncias, confirma que a distância da falta realmente é composta pelas impedâncias de sequência zero e positiva.

Com relação à aplicabilidade do trabalho, foi demonstrado que a operação realizada por uma equipe de campo que procura pelo defeito que originou a falta é bastante facilitada, pois a

área de busca fica bastante restrita. Esta facilitação se dá graças ao fato de os valores absolutos dos erros de estimação serem, em sua maioria, inferiores a 500m, o que acarreta um enorme ganho de tempo e agilidade no restabelecimento do fornecimento de energia. Sugere-se, inclusive, que a forma de abordagem para a localização da falta mostrada no estudo de caso sirva de modelo de procedimento a ser adotado operacionalmente pelas equipes das concessionárias de energia.

Caso haja interesse em replicar os resultados obtidos em outros sistemas de distribuição, sempre que possível, recomenda-se a estimação direta da distância da falta, em vez de calculá-la com as impedâncias de sequência. Isso se justifica, primeiramente, pelo fato de ser necessário realizar o treinamento de um único SIF, ao invés de dois distintos, o que poupa trabalho computacional sem renunciar ao desempenho e à eficiência da estimação. Em segundo lugar, embora os níveis de erro tenham sido similares em ambas as formas de obtenção da distância da falta, a faixa de distância onde o erro médio é próximo de zero é menor quando estima-se diretamente a distância da falta. Este fato torna-se vantajoso quando da definição da área mais provável da localização da falta. Idealmente, o erro com média zero deve estar o mais próximo possível da distância zero, pois isso diminui o raio de atuação da equipe de manutenção que vasculha a rede de distribuição pelo ponto faltoso.

Mesmo com o objetivo alcançado, ainda há espaço para melhorias na metodologia e na modelagem, sobre as quais alguns comentários são tecidos a seguir. O primeiro deles refere-se à modelagem do sistema de distribuição. Para obter resultados mais fidedignos à realidade, é necessário incluir na modelagem do sistema de distribuição características como a presença de cargas, de geração distribuída, de impedância de falta e de pequenos desbalanços de tensão. Além disto, também convém investigar diferentes tipos de falta. Tudo isto aumenta ainda mais a aplicabilidade da tese e sua contribuição para o desenvolvimento das *smart grids*.

Outro comentário necessário refere-se aos resultados obtidos pelo SIF. Não fosse a dificuldade em estimar-se valores das grandezas quando estes são próximos a zero, os erros absolutos médios percentuais estariam em patamares ainda menores pois, para valores pequenos, qualquer desvio representa uma grande percentagem. Esta dificuldade era ainda maior quando da apresentação dos resultados parciais no exame de qualificação desta tese, e o procedimento que proporcionou uma notória melhora foi não normalizar os dados das grandezas em p.u.

Com respeito a trabalhos futuros, existe obviamente a intenção de implementar as melhorias citadas anteriormente, além de aplicar a metodologia de localização de faltas em diferentes alimentadores e em diferentes sistemas de distribuição. Deseja-se também investigar

o funcionamento da metodologia para outros tipos de falta, e até mesmo analisar se os resultados seriam semelhantes aos obtidos se houvesse um menor número de medidores, alocados segundo uma metodologia de otimização do posicionamento e minimização da quantidade de PMUs, por exemplo como proposto em [48].

Distanciando-se da área de sistemas elétricos, existe ainda mais um interessante trabalho que pode ser desenvolvido. Redes de distribuição de água podem ser modeladas com várias similaridades à modelagem de um sistema elétrico de distribuição. As principais grandezas de uma rede de distribuição de água são vazão e pressão, que são bastante análogas à corrente e tensão, respectivamente. Quando ocorre um vazamento, percebe-se aumento de vazão e diminuição de pressão, assim como a corrente aumenta e a tensão diminui durante uma falta. Além disto, fazer a medição de pressão ao longo do sistema é menos custoso que fazer a medição de vazão. Por estes motivos, anseia-se aplicar a metodologia de localização de faltas desenvolvida nesta tese a um sistema de abastecimento de água para localizar vazamentos, utilizando apenas dados de pressão coletados ao longo da rede de distribuição de água.

REFERÊNCIAS

- [1] Grupo de Trabalho de Redes Elétricas Inteligentes - Ministério de Minas e Energia, “Relatório: Smart Grids,” 15 Abril 2010. [Online]. Available: http://www.mme.gov.br/documents/10584/1256641/Relatxrio_GT_Smart_Grid_Portaria_440-2010.pdf/3661c46c-5f86-4274-b8d7-72d72e7e1157. [Acesso em 16 Fevereiro 2019].
- [2] Q. Zhang, Y. Sun e Z. Cui, “Application and Analysis of ZigBee Technology for Smart Grid,” em *International Conference on Computer and Information Application (ICCIA)*, Tianjin, China, 2010.
- [3] Z. Alliance, “Zigbee Alliance,” [Online]. Available: <http://www.zigbee.org/>. [Acesso em 05 2018].
- [4] P. M. Anderson, *Analysis of Faulted Power Systems*, Nova York: IEEE Press Power Systems Engineering Series, 1973.
- [5] R. A. Flauzino, “Identificação e Localização de Faltas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição Baseadas em Decomposição por Componentes Ortogonais e Inferência Fuzzy,” Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 2007.
- [6] A. Sanches Fonseca Sobrinho, *Desenvolvimento de uma Unidade de Medição Fasorial Otimizada para Sistemas de Distribuição*, São Carlos: Tese de Doutorado - Universidade de São Paulo, 2016.
- [7] Agência Nacional de Energia Elétrica, “Resolução Normativa 43 de 2010,” 2010. [Online]. Available: http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2010/043/documento/resolucao_medicao_-_ap_43_2010.pdf. [Acesso em 17 Fevereiro 2019].
- [8] L. A. d. Moraes, *Desenvolvimento de uma Abordagem Fuzzy para Estimação de Demanda de Potência em um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica*, São Carlos: Universidade de São Paulo - Dissertação de Mestrado, 2014.
- [9] M. Mirzaei, M. Z. A. A. Kadir, E. Moazami e H. Hizam, “Review of Fault Location Methods for Distribution Power System,” *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, pp. 2670-2676, Julho 2009.
- [10] W. D. Stevenson, *Elements of Power System Analysis*, Nova York: McGraw-Hill, 1955.
- [11] L. C. Zanetta Jr., *Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência*, São Paulo, 2008.
- [12] G. Kindermann, *Curto-Circuito*, Porto Alegre: Sagra Luzzato, 1997.
- [13] F. J. R. Santana, L. A. L. d. Almeida e M. Fontana, “SISLOG - Sistemas de Localização de Faltas Georeferenciada,” Agência Nacional de Energia Elétrica, 2007. [Online].

Available: <http://www2.aneel.gov.br/biblioteca/citenel2007/pdf/it85.pdf>. [Acesso em 30 07 2016].

- [14] D. Courtney, T. Litter, J. Livie e K. Lennon, "Localised Fault Location on a Distribution Network – Case Studies and Experience," *The Journal of Engineering - The 14th International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2018)*, pp. 885-890, 23 05 2018.
- [15] T. Takagi, Y. Yanakoshi, M. Yamaura, R. Kondow e T. Matsushima, "Development of a New Type Fault Locator using the One Terminal Voltage and Current Data," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 2892-2898, Agosto 1982.
- [16] R. H. Salim, *Novos Desenvolvimentos na Localização de Faltas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Fundamentada na Impedância*, Porto Alegre: Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.
- [17] D. A. C. Lima, *Localização de Faltas em Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica baseada na Impedância Aparente: Algoritmo Utilizando Dados de Um Terminal*, Porto Alegre: Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.
- [18] G. M. España, J. M. Flórez e H. V. Torres, "Fault Location Method based on the Determination of the Minimum Fault Reactance for Uncertainty Loaded and Unbalanced Power Distribution Systems," em *IEEE Power and Energy Society - Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, São Paulo, 2010.
- [19] L. Yang e C. Springs, "One Terminal Fault Location System that Corrects for Fault Resistance Effects". Estados Unidos Patente 5773980, 1998.
- [20] M. Washer, J.-C. Maun, C. Dzienis, M. Kereit, Y. Yelgin e J. Blumschein, "Precise Impedance Based Fault Location Algorithm with Fault Resistance Separation," em *IEEE PowerTech*, Eindhoven, 2015.
- [21] X. Hao, Z. Meng, W. Huang, T. Tao e Y. Wang, "The Fault Location Method of Distribution Network with Fault Indicators Based on Impedance," em *International Conference on Automation, Mechanical Control and Computational Engineering*, Ji'nan (China), 2015.
- [22] S. F. Alwash, V. K. Ramachandaramurthy e N. Mithulananthan, "Fault-Location Scheme for Power Distribution System with Distributed Generation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1187-1195, Junho 2015.
- [23] P. G. McLaren e P. A. Crossley, "Distance Protection based on Travelling Waves," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 2971-2983, Setembro 1983.
- [24] S. C. A. d. Souza, A. P. S. Braga, R. P. S. Leão, O. M. Almeida, A. R. Almeida e F. C. M. Abreu, "Uso de Redes Neurais Artificiais e Transformada de Stockwell na Localização de Faltas em Linhas de Transmissão," em *XII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, Natal, 2015.

- [25] L. Rui, F. Guoqing, Z. Xueyuan e X. Xue, "Fault Location Based on Single Terminal Travelling Wave Analysis in Radial Distribution Network," *Electrical Power and Energy Systems*, pp. 160-165, 19 Novembro 2014.
- [26] D. W. P. Thomas, R. J. O. Carvalho e E. T. Pereira, "Fault Location in Distribution Systems on Traveling Waves," em *Power Tech Conference Proceedings*, Bologna, 2003.
- [27] M. d. Silva, Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Utilizando a Teoria de Ondas Viajantes e Transformada Wavelet, São Carlos: Universidade de São Paulo - Dissertação de Mestrado, 2003.
- [28] T. F. Valins, Relé Digital de Distância Baseado na Teoria de Ondas Viajantes e Transformada Wavelet, São Carlos: Universidade de São Paulo - Dissertação de Mestrado, 2005.
- [29] A. Borghetti, M. Bosetti, C. A. Nucci, M. Paolone e A. Abur, "Integrated Use of Time-Frequency Wavelet Decompositions for Fault Location in Distribution Networks: Theory and Experimental Validation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 3139-3146, Outubro 2010.
- [30] S. Shi, A. Lei, X. He, S. Mirsaeidi e X. Dong, "Travelling Waves-Based Fault Location Scheme for Feeders in Power Distribution Network," *The Journal of Engineering - The 14th International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2018)*, pp. 1326-1329, 11 06 2018.
- [31] J. Sadeh, E. Bakhshizadeh e R. Kazemzadeh, "A New Fault Location Algorithm for Radial Distribution Systems using Modal Analysis," *Electrical Power and Energy Systems*, pp. 271-278, Outubro 2012.
- [32] J. Coser, Contribuições aos Métodos para Localização de Faltas em Alimentadores de Distribuição, Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina - Tese de Doutorado, 2006.
- [33] M. Moreto, Localização de Faltas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição de Energia: Uma Metodologia Baseada em Redes Neurais Artificiais, Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Dissertação de Mestrado, 2005.
- [34] M. Daisy e R. Dashti, "Single Phase Fault Location in Electrical Distribution Feeder using Hybrid Method," *Energy*, pp. 356-368, 25 Março 2016.
- [35] A. C. Adewole, R. Tzoneva e S. Behardien, "Distribution Network Fault Section Identification and Fault Location using Wavelet Entropy and Neural Networks," *Applied Soft Computing*, pp. 296-306, 19 Maio 2016.
- [36] R. Z. Fanucchi, A Detecção e a Localização de Faltas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição utilizando Transformadas Wavelets e Redes Neurais Artificiais, São Carlos: Universidade de São Paulo - Dissertação de Mestrado, 2014.

- [37] M.-R. Mosavi e A. Tabatabaei, "Traveling-Wave Fault Location Techniques in Power System Based on Wavelet Analysis and Neural Network Using GPS Timing," *Wireless Personal Communications*, pp. 835-850, 25 Julho 2015.
- [38] A. A. P. Bísaro, R. A. F. Pereira, M. Kezunovic e J. R. S. Mantovani, "Integrated Fault Location and Power-Quality Analysis in Electric Power Distribution Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 428-436, Abril 2016.
- [39] G. Luo, C. Yao, Y. Liu, Y. Tan, J. He e K. Wang, "Stacked Auto-Encoder Based Fault Location in VSC-HVDC," *IEEE Access Vol. 6*, pp. 33216-33224, 14 06 2018.
- [40] M. Mastroleo, R. Ugolotti, L. Mussi, E. Vicari, F. Sassi, F. Sciocchetti, B. Beasant e C. McIlroy, "Automatic Analysis of Faulty Low Voltage Network Asset Using Deep Neural Networks," *The Journal of Engineering - The 14th International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2018)*, pp. 851-855, 23 05 2018.
- [41] I. Niazazari e H. Livani, "A PMU-Data-Driven Disruptive Event Classification in Distribution Systems," *Electric Power Systems Research*, pp. 251-260, 04 01 2018.
- [42] L. H. Tsoukalas e R. E. Uhrig, *Fuzzy and Neural Approaches in Engineering*, Nova York, Estados Unidos: John Wiley and Sons, 1997.
- [43] H.-J. Zimmermann, *Fuzzy Set Theory and Its Applications*, Norwell, Estados Unidos: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [44] M. Brown e C. Harris, *Neurofuzzy Adaptive Modelling and Control*, Londres, Inglaterra: Prentice Hall, 1994.
- [45] J.-S. R. Jang, C.-T. Sun e E. Mizutani, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*, Englewood Cliffs, Estados Unidos: Prentice Hall, 1997.
- [46] J. E. Dennis e R. B. Schnabel, *Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations*, Englewood Cliffs, Estados Unidos: Prentice Hall, 1983.
- [47] W. Pedrycz e F. A. C. Gomide, *An Introduction to Fuzzy Sets – Analysis and Design*, Cambridge, Estados Unidos: MIT Press, 1998.
- [48] M. E. H. Golshan, S. H. H. Dolatabadi e S. M. Tabatabaei, "Determining Minimum Number and Optimal Placement of PMUs for Fault Observability in One-Terminal Algorithms," *IET Generation, Transmission & Distribution*, pp. 5789-5797, 05 09 2018.