

**LOCALIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS
EM LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO O
MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS E
INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL**

CARLOS ALBERTO SEVERIANO JUNIOR

**LOCALIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS
EM LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO O
MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS E
INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: RODNEY REZENDE SALDANHA
CO-ORIENTADOR: DOUGLAS ALEXANDRE GOMES VIEIRA

Belo Horizonte
Fevereiro de 2013

© 2013, Carlos Alberto Severiano Junior.
Todos os direitos reservados.

Severiano, Carlos

Localização e Classificação de Faltas em Linhas de
Transmissão Utilizando o Método dos Mínimos Quadrados e
Inteligência Computacional / Carlos Alberto Severiano Junior.

— Belo Horizonte, 2013

xxi, 60 f. : il. ; 29cm

Dissertação (mestrado) — Universidade Federal de Minas
Gerais

Orientador: Rodney Rezende Saldanha

Co-orientador: Douglas Alexandre Gomes Vieira

1. Linhas de Transmissão. 2. Localização de Faltas.
3. Classificação de Faltas.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Beto e Tereza, e meus irmãos, Gláucia e Marcus, pelo apoio incondicional ao longo de mais este desafio.

Agradeço muito aos meus orientadores, Rodney e Douglas, por todo o conhecimento de valor inestimável que me proporcionaram ao longo deste trabalho.

Agradeço também aos meus colegas de universidade, em especial as turmas de GOPAC e ENACOM, que tantas vezes me apoiaram neste trabalho.

E por fim, mas não menos importante, agradeço a todos os meus amigos que sempre fizeram parte dessa caminhada, através do companheirismo que me ajudou a manter o foco.

Esta dissertação teve o apoio da Companhia de Transmissão de Energia Elétrica - CTEEP no projeto de P&D Aneel PD-0068-0003/2010 "Desenvolvimento de metodologia e ferramentas computacionais para análise automática de faltas". Este projeto foi desenvolvido em parceria pela ENACOM e ASOTech.

Resumo

O trabalho aqui proposto é direcionado à análise de faltas ocorridas em linhas de transmissão de energia. Nele são apresentadas uma técnica de localização de faltas e outra de classificação de eventos quanto ao efeito causador (descarga elétrica ou queimada). A técnica de localização de faltas apresentada foi desenvolvida a partir da aplicação das Lei das Tensões de Kirchhoff em um circuito equivalente. O método, que define a distância entre a falta e um dos terminais, realiza também uma estimativa de impedância de falta. Sua formulação segue o modelo de um problema de otimização, cuja solução é obtida através do método Estimador de Mínimos Quadrados. Na obtenção da solução são processadas janelas de tensão e corrente da linha, tornando o método menos sensível a sinais ruidosos. O modelo apresentado para classificação de faltas quanto ao evento causador se baseia na avaliação de algumas informações originalmente aplicadas a problemas de localização de faltas e classificação de faltas quanto à natureza elétrica, já que o assunto é ainda pouco explorado. A técnica apresentada avalia uma série de características extraídas dos sinais de tensão e corrente da linha, como duração da falta, impedância, energia harmônica e decomposições no domínio tempo-frequência. Estas características são avaliadas preliminarmente por um método de seleção de características. Com base nos resultados da seleção, as características tidas como mais relevantes são utilizadas para a elaboração de um modelo classificador baseado na técnica de Máquina de Vetores de Suporte (do inglês *Support Vector Machines - SVMs*). Para a avaliação das técnicas apresentadas, são utilizados dados simulados de falta e registros reais fornecidos pela CTEEP - Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista.

Palavras-chave: Linhas de Transmissão, Localização de Faltas, Classificação de Faltas, Estimativa de Impedância.

Abstract

This work analyses faults in power transmission lines and presents techniques for fault location and classification of the causative events (lightning or fire). The presented fault location technique was developed from the application of the Kirchhoff's Voltage Law to an equivalent circuit. The method, which defines the distance between the fault and one of the line terminals, also estimates fault impedance. Its formulation follows the model of an optimization problem whose solution is obtained by means of the Least Squares Estimate. It can work with a window of voltages and currents, making the algorithm less sensitive to noisy signals. The model presented for classification of faults based on the causative event uses some information originally applied to problems of fault location or fault classification under its electrical nature (such as line-to-ground and line-to-line), since the kind of fault studied in this work is still underexplored. The technique evaluates some features extracted from current and voltage signals such as fault duration, impedance, harmonic energy and decompositions under the time-frequency domain. The features are preliminarily ranked by a feature selection method. According to the results of the selection, the most relevant features are used to develop a classifier model based on Support Vector Machines (SVMs). The presented techniques are evaluated by simulated data and real fault records provided by a power supplier company.

Keywords: Transmission Lines, Fault Location, Fault Classification, Impedance Estimation.

Resumo Estendido

Seção 1 - Introdução

A seção contextualiza sobre a motivação da realização deste trabalho, que se concentra na proposta de técnicas para diagnóstico de faltas. São também apresentados os objetivos realizados para apresentar contribuições sobre o problema. É também citada a produção científica gerada com base nos trabalhos descritos nesta dissertação.

Seção 2 - Linhas de Transmissão

Nesta seção é feita uma introdução sobre o objeto analisado no trabalho, que são as linhas transmissão de energia. É descrito o modelo de linha utilizado no trabalho, representado como um circuito.

Seção 3 - Processamento de Sinais

A seção cita as técnicas utilizadas para o processamento dos sinais registrados nos canais de tensão e corrente das linhas de transmissão avaliadas. As representações produzidas a partir dessas técnicas são utilizadas na quantificação dos valores considerados nas técnicas de localização de classificação apresentadas.

Seção 4 - Localização de Faltas

A seção descreve o problema de localização de faltas. São descritas diferentes abordagens para a solução do problema apresentadas na literatura. Na seção é também detalhado um novo método de localização de faltas proposto neste trabalho.

Seção 5 - Classificação de Faltas

O problema de classificação de faltas quanto ao evento causador é apresentado na seção. São apontados trabalhos presentes na literatura que se relacionam com o problema aqui abordado. Por fim, são detalhados na seção os passos adotados no processo de elaboração do método de classificação: extração de características, seleção de características e classificação das amostras.

Seção 6 - Resultados

A seção exibe resultados da avaliação dos métodos de localização e classificação propostos. São apresentados resultados gerados a partir de dados de falta simulados e reais.

Seção 7 - Conclusão e Trabalhos Futuros

Aqui são apresentadas as conclusões finais sobre o trabalho realizado e discutidos caminhos para trabalhos futuros.

Lista de Figuras

2.1	<i>Representação genérica de um circuito simples. Saha et al. [2010]</i>	6
2.2	<i>Representação simplificada de circuito simples considerando somente a linha em análise.</i>	6
2.3	<i>Linha de Transmissão no formato de um Quadripolo.</i>	7
2.4	<i>Linha de Transmissão Trifásica.</i>	9
2.5	<i>Oscilografia de uma ocorrência de falta - domínio do tempo.</i>	10
2.6	<i>Oscilografia de uma ocorrência de falta - domínio fasorial.</i>	11
2.7	<i>Linha de Transmissão Trifásica - Efeito de Impedância mútua</i>	13
2.8	<i>Circuito representado por Componentes Simétricas</i>	15
2.9	<i>Decomposição de Sinal a partir de Transformada Wavelet.</i>	16
2.10	<i>Decomposição de Multinível do Sinal a partir de Transformada Wavelet.</i>	17
3.1	<i>Circuito Pós-Falta representado pelas componentes de sequência.</i>	22
3.2	<i>Erro $\varepsilon(t)$ de reconstrução fasorial.</i>	29
5.1	<i>Exemplo de Linha de Transmissão no ATP-EMTP.</i>	44
5.2	<i>MLEMQ - Distância x Falta</i>	45
5.3	<i>MLEMQ - Distância x Falta - Ruído no Sinal</i>	46
5.4	<i>Comparativo entre Métodos de Localização de Falta</i>	47
5.5	<i>MLEMQ - Distância x Falta</i>	49
5.6	<i>MLEMQ - Distância x Falta - Ruído no Sinal</i>	49
5.7	<i>Impedância Real x Impedância Absoluta.</i>	51
5.8	<i>Duração x Energia Harmônica.</i>	51

Lista de Tabelas

5.1	Parâmetros dos terminais	43
5.2	Parâmetros da linha	44
5.3	MLEMQ - Erro médio de localização para variações nas impedâncias Z_0 e Z_1 da linha.	47
5.4	Testes em Casos Reais	48
5.5	Base de dados de treinamento	50
5.6	Resultado de Seleção de Características	50
5.7	Resultado da Classificação	52

Lista de Símbolos

Símbolo	Descrição
g	Fator de escala da transformada <i>Wavelet</i>
h	Fator de translação da transformada <i>Wavelet</i>
I_{ai}, I_{bi} e I_{ci}	Corrente Fase A, B e C - terminal i (i=S ou R)
I_{pi}, I_{ni} e I_{zi}	Corrente Sequência +, - e 0 - terminal i (i=S ou R)
I_f	Corrente de Falta
I_s^{PoF}	Corrente no circuito puro de falta direcionada para o terminal S
I_r^{PoF}	Corrente no circuito puro de falta direcionada para o terminal R
j	Número complexo
$K(x_i, x_j)$	Função <i>Kernel</i>
R	Terminal Receptor (receive)
R_f	Resistência de Falta
$s(t)$	Sinal medido em oscilografia em função do tempo
s_m	Amplitude do sinal medido em oscilografia
s_3	Terceiro harmônico do sinal medido em oscilografia
S	Terminal Emissor (send)
V_{as}, V_{bs} e V_{cs}	Tensão Fase A, B e C - terminal S
V_{ar}, V_{br} e V_{cr}	Tensão Fase A, B e C - terminal R
V_{ps}, V_{ns} e V_{zs}	Tensão Sequência +, - e 0 - terminal S
V_{pr}, V_{nr} e V_{zr}	Tensão Sequência +, - e 0 - terminal R
Y	Matriz de admitâncias da linha
Y_c	Admitância característica da linha

Lista de Símbolos

Símbolo	Descrição
z_{abc}	Impedância de Fase da Linha - Modelo Série
z_{ai}, z_{bi} e z_{ci}	Impedância de Fase do Circ. Equivalente da Fonte - term. i (i=S ou R)
z_{pi}, z_{ni} e z_{zi}	Impedância de Sequência do Circ. Equivalente da Fonte - term. i (i=S ou R)
z_0	Impedância de Sequência Zero da Linha - Modelo Série
z_p	Impedância de Sequência Positiva da Linha - Modelo Série
z_n	Impedância de Sequência Negativa da Linha - Modelo Série
z_{ns}	Impedância Negativa para Circuito à esquerda do Terminal S
z_{nr}	Impedância Negativa para Circuito à direita do Terminal R
Z	Matriz de impedâncias série da linha
Z_c	Impedância Característica da Linha
Z_{ci}	Impedância Característica da Linha de Sequência i (i=p, n ou z)
Z_n	Impedância Longitudinal Total da Linha
γ	Constante de Propagação
γ_i	Contante de Propagação de Sequência i (i=p, n ou z)
l	Comprimento Total da Linha
l_S	Distância da Falta ao Terminal S
l_R	Distância da Falta ao Terminal R
φ	Fase da componente fundamental
φ_3	Fase do terceiro harmônico
ω	Frequência angular fundamental
ψ	Função <i>Wavelet-mãe</i>

Lista de Abreviações

Sigla	Descrição
<i>CTEEP</i>	Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista
<i>DWT</i>	<i>Discrete Wavelet Transform</i>
<i>ELM</i>	<i>Extreme Learning Machine</i>
<i>KNN</i>	<i>K-Nearest Neighbour</i>
<i>MLEMQ</i>	Método de Localização baseado em Estimativa por Mínimos Quadrados
<i>RBF</i>	<i>Radial Basis Function</i>
<i>SEP</i>	Sistema Elétrico de Potência
<i>SVM</i>	<i>Support Vector Machines</i>

Sumário

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	ix
Resumo Estendido	xi
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xv
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivo	2
1.2.1 Metodologia	2
1.3 Produção Científica	3
2 Linhas de Transmissão	5
2.1 Circuito Simples	6
2.2 Representação Quadripolo	6
2.3 Modelo Nominal Série	8
2.4 Linhas de Transmissão Trifásicas	9
2.5 Processamento de Sinais	9
2.5.1 Representação Fasorial	10
2.5.2 Representação por Componentes Simétricas	13
2.5.3 Análise do Sinal nos domínios de Tempo e Frequência	14
3 Localização de Faltas	19
3.1 O Problema de Localização de Faltas	19

3.2	Revisão Bibliográfica	20
3.2.1	Development of a new type fault locator using the one terminal voltage and current data - 1982 - K. Takagi and Y. Yomakoshi and M. Yamaura and R. Kondow and T. Matsushima - Takagi et al. [1982]	20
3.2.2	New Multi-Ended Fault Location Design for Two - or Three - Terminal Lines - 2001 - D. A. Tizouvaras and J. Roberts and G. Benmouyal - Tizouvaras et al. [2001]	21
3.2.3	New Approach for Fault Location on Transmission Lines Not Requiring Line Parameters - 2009 - Z. M. Radojevic and C. H. Kim and M. Popov and G. Preston and V. Terzija - Radojevic et al. [2009]	22
3.2.4	A closed form solution for transmission line fault location without the need of terminal synchronization or line parameters - 2013 - D. A. G. Vieira and D. B. Oliveira and A. C. Lisboa - Vieira et al. [2013a]	23
3.3	Método de Localização baseado em Estimativa por Mínimos Quadrados - MLEMQ	24
3.3.1	Formulação do Problema	24
3.3.2	Localização de Faltas como um problema de otimização	25
3.3.3	Escolha da Janela de Medição	28
4	Classificação de Faltas	31
4.1	Classificação de Faltas quanto ao Evento Causador	31
4.2	Revisão Bibliográfica	32
4.2.1	Intelligent approaches using support vector machine and extreme learning machine for transmission line protection - 2010 - V. Malathi, N.S. Marimuthub, S. Baskar - Malathi et al. [2010]	32
4.2.2	Energy and entropy-based feature extraction for locating fault on transmission lines by using neural network and wavelet packet decomposition - 2008 - S. Ekici, S. Yildirim, M. Poyraz - Ekici et al. [2008]	33
4.2.3	Automatic classification of power quality events and disturbances using wavelet transform and support vector machines - 2012 - H. Eristi, Y. Demir - Eristi & Demir [2012]	34

4.2.4	Detecção e Classificação de Falhas em Linhas de Transmissão utilizando Análise Funcional e Inteligência Computacional - 2011 - A. S. Gomes - Gomes [2011]	34
4.2.5	Location of faults generating short-duration voltage variations in distribution systems regions from records captured at one point and decomposed into damped sinusoids - 2012 - L. Lovisolo, J.A. Moor Neto, K. Figueiredo, L. de Menezes Laporte, J.C. dos Santos Rocha - Lovisolo et al. [2012]	35
4.3	Extração de Características	36
4.3.1	Duração da Falta	36
4.3.2	Energia Harmônica	37
4.3.3	Impedância da Falta	37
4.3.4	Energia do Sinal a partir de Transformada <i>Wavelet</i>	37
4.4	Seleção de Características	38
4.5	Máquina de Vetores de Suporte	40
5	Resultados	43
5.1	Testes de Localização de Falhas	43
5.1.1	Ambiente de Testes - ATP-EMTP	43
5.1.2	Distância x Impedância da Falta	44
5.1.3	Comparativo entre técnicas de Localização	45
5.1.4	Incerteza na Impedância da Linha	46
5.1.5	Testes em Casos Reais	48
5.1.6	Estimativa de Impedância da Falta	48
5.2	Testes de Classificação de Falhas	50
5.2.1	Resultado de Seleção de Características	50
5.2.2	Resultado de Classificação de Falhas	50
6	Conclusão e Trabalhos Futuros	53
6.1	Trabalhos Futuros	53
6.1.1	MLEMQ para Linhas Longas	53
6.1.2	Melhorias no Modelo de Classificação	54
	Referências Bibliográficas	57

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

Os Sistemas Elétricos de Potência - SEPs vêm atingindo graus maiores de complexidade ao longo das últimas décadas. No Brasil, o Sistema Interligado Nacional, que congrega em torno de 96% da capacidade de produção de energia do país, possui em sua principal malha 89,2 mil km de linhas de transmissão, ANEEL [2013], ONS [2013]. Alinhado a isso, surge a necessidade de se implementar processos de fornecimento de energia de boa qualidade e custos reduzidos, incentivada pela regulamentação e competitividade do setor. Dentro desse contexto, tem-se um forte investimento em medidas para auxiliar na prevenção e manutenção de falhas ocorridas em um SEP.

As linhas de transmissão são consideradas um dos componentes mais vulneráveis do SEP, dado que em toda a sua extensão estão sujeitas aos mais diversos tipos de fenômenos naturais, como descargas atmosféricas, queimadas, vendavais, dentre outros. Tais situações podem causar distúrbios na linha, ocasionando faltas que podem levar até mesmo à interrupção da transmissão de energia na mesma. Portanto, há uma preocupação em se desenvolver técnicas que possam auxiliar na prevenção e manutenção de tais problemas. No caso de linhas de transmissão, muitos esforços se concentram no diagnóstico de faltas, uma vez que, além do fator de vulnerabilidade das linhas, há também a constatação de que o tempo para a realização de uma checagem física das linhas é normalmente maior do que em outros componentes, como o sistema de distribuição, conforme discutido em Saha et al. [2010].

As etapas de diagnóstico realizadas a partir da **detecção** de uma falta ocorrida na linha, envolvem o processo de **localização**, que consiste na determinação do ponto em que o evento ocorreu e ainda processos de **classificação** do evento ocorrido sob critérios de interesse. Em todos os casos, existe a motivação de se prover ferramentas

automatizadas que possam auxiliar equipes de manutenção na normalização do sistema.

A utilidade de um processo adequado de localização se torna evidente ao se observar que muitas linhas de transmissão possuem centenas de quilômetros de extensão. Desse modo, a indicação do local da falta pode reduzir o tempo gasto na manutenção. Já os processos classificatórios podem auxiliar na preparação, por parte da equipe de manutenção, do conjunto de medidas a serem adotadas na normalização do sistema. Por exemplo, um processo de classificação da falta quanto ao evento causador da falta que retorna que a mesma foi causada por uma queimada, auxilia a equipe a antecipar o acionamento de outras equipes que podem auxiliar na resolução da ocorrência, como o Corpo de Bombeiros.

Atualmente, os mecanismos de proteção de uma linha de transmissão são, em geral, compostos de relés digitais que, com base nas medições observadas e o auxílio de algoritmos específicos, atuam nas etapas de diagnóstico de faltas. A partir dos resultados desses algoritmos é feita a tomada de decisão sobre as operações de proteção do SEP, como a abertura de disjuntores. Diante dessa composição, o trabalho aqui proposto tem como premissa prover técnicas que possam ser integradas ao sistema de proteção de linhas de transmissão para auxiliar em algumas etapas de diagnósticos de faltas.

1.2 Objetivo

O trabalho aqui apresentado é direcionado à elaboração e avaliação de técnicas que possam contribuir para o diagnóstico de faltas em linhas de transmissão. Mais especificamente, são apresentadas técnicas para os problemas de:

- Localização de faltas;
- Classificação de faltas quanto ao evento causador.

1.2.1 Metodologia

Para o problema de localização, uma formulação de um circuito equivalente de uma linha de transmissão é avaliada como um problema de otimização, cuja solução provê informações sobre a distância entre o ponto de ocorrência da falta e um dos terminais que compõe a linha. Também está contido na solução do problema o valor de impedância da falta ocorrida. Para a solução do problema, é aplicada a técnica de Estimativa por Mínimos Quadrados. A técnica é avaliada a partir de simulações de faltas e também casos reais.

No problema de classificação de faltas, são avaliados casos reais de falta para a identificação do evento causador das mesmas. A base utilizada consiste em um conjunto de faltas causado por queimadas ou descargas elétricas. Primeiramente, são avaliadas informações extraídas a partir de registros de oscilografia obtidos durante um período de falta. As informações melhor avaliadas são apontadas como de maior relevância e utilizadas na elaboração de um modelo de classificação destinado a apontar o evento causador de faltas.

Na condução desses processos de análise, é levado em conta um fator em comum que é a linha de transmissão sendo vista como um circuito moldado a partir de todas as características que o modelo da arquitetura avaliada estabelece. Diante de tais fatores, são reunidos os elementos fundamentais para a formulação das informações que darão o resultado esperado para cada técnica.

1.3 Produção Científica

Com base nos estudos apresentados neste trabalho, o seguinte artigo foi produzido:

- C. A. Severiano, D. A. G. Vieira, R. R. Saldanha, E. G. Silveira and A. C. Lisboa (2013). Fault Classification in Transmission Lines based on the causative event using SVM. *Power and Energy Conference at Illinois*, (a ser publicado).

Além disso, o seguinte artigo foi submetido:

- D. A. G. Vieira, E. G. Silveira, C. A. Severiano, R. R. Saldanha and A. C. Lisboa (2013). A transmission line fault location method for noisy data based on least squares estimate. *IET Generation, Transmission & Distribution*

Capítulo 2

Linhas de Transmissão

As linhas de transmissão são mecanismos condutores utilizados para o transporte de energia elétrica. Em sua estrutura, são definidos pontos transmissores e receptores, de modo que a energia siga esse fluxo durante seu transporte. Como discutido em Saha et al. [2010], do ponto de vista de análise de faltas, alguns fatores que variam a cada modelo de linha são de maior interesse, como:

- Construção (aérea ou subterrânea);
- Materiais usados;
- Geometria da linha;
- Nível de Tensão;
- Configuração de circuito (simples ou duplo);
- Número de terminais (dois terminais ou multi-terminal);
- Distância entre os terminais.

Diante de tais alternativas, diversos modelos são formulados para linhas de transmissão. Nas subseções seguintes é apresentada uma visão da linha de transmissão como circuito, sendo detalhada a representação quadripolo, utilizada na descrição das equações de modelos de **parâmetros distribuídos** e **nominal série**. Este último modelo foi aplicado no desenvolvimento e avaliação dos métodos propostos neste trabalho.

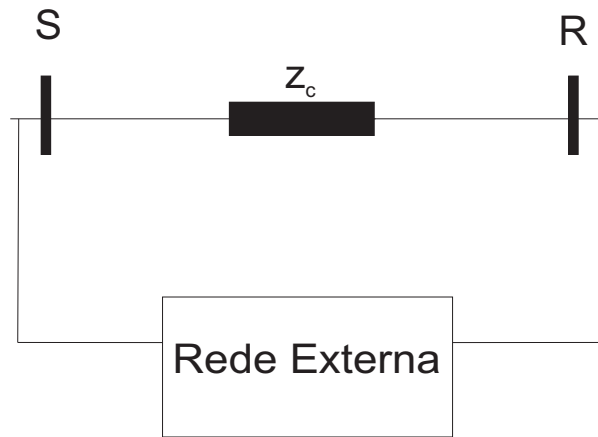


Figura 2.1 Representação genérica de um circuito simples. Saha et al. [2010]

2.1 Circuito Simples

As linhas aéreas de circuito simples são considerados uns dos meios mais simples de transmissão de energia, Saha et al. [2010]. Sua representação, no entanto, serve como base para a compreensão do circuito formado por uma linha de transmissão. A figura 2.1 ilustra uma linha de circuito simples formado por um terminal emissor S e um receptor R pertencentes a um sistema de transmissão de energia. A linha possui uma impedância representada por Z_c . Sua vizinhança é indicada na figura 2.1 pelo componente **Rede Externa**. Com o objetivo de se analisar isoladamente a linha em questão, suas conexões com as demais linhas do sistema de transmissão podem ser substituídas pelas tensões V_s e V_r existentes nos terminais que a compõem, como ilustrado na figura 2.2.

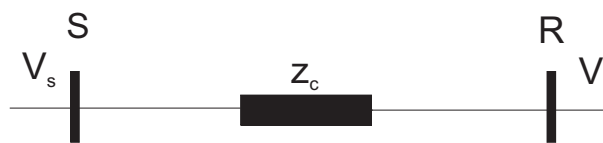


Figura 2.2 Representação simplificada de circuito simples considerando somente a linha em análise.

2.2 Representação Quadripolo

A análise de um circuito simples como o descrito na seção anterior pode ser esquematizada no formato de um quadripolo, como na figura 2.3. O modelo é comumente utilizado para a representação de circuitos elétricos. Nele, é identificada uma linha de transmissão $T(x)$ de comprimento ℓ , composta pelos terminais S e R , que possuem dois polos cada, onde as correntes à esquerda possuem a mesma magnitude, assim como as

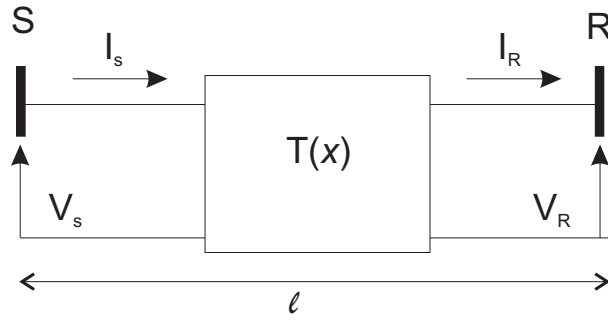


Figura 2.3 Linha de Transmissão no formato de um Quadripolo.

posicionadas à direita. Considerando que a linha possui uma impedância característica Z_c , uma constante de propagação γ e uma admitância característica Y_c , temos que os valores para tensão e corrente ao longo de qualquer ponto x da mesma podem ser calculados a partir das equações definidas em 2.1.

$$\begin{aligned} V(x) &= \cosh(\gamma x)V_s - Z_c \sinh(\gamma x)I_s \\ I(x) &= -Y_c \sinh(\gamma x)V_s + \cosh(\gamma x)I_s \end{aligned} \quad (2.1)$$

Ou em sua forma matricial, temos:

$$\begin{bmatrix} V(x) \\ I(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma x) & -Z_c \sinh(\gamma x) \\ -Y_c \sinh(\gamma x) & \cosh(\gamma x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

As equações de 2.1 podem ser reescritas para representarem os valores de tensão e corrente no terminal receptor R. Para tanto, considera-se $x = \ell$, de modo que:

$$\begin{aligned} V(x = \ell) &= V_r \\ I(x = \ell) &= I_r \end{aligned} \quad (2.3)$$

Portanto, 2.2 passa a ser representada da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma \ell) & -Z_c \sinh(\gamma \ell) \\ -Y_c \sinh(\gamma \ell) & \cosh(\gamma \ell) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

As constantes isoladas na matriz em 2.4 são o conjunto de parâmetros ABCD

da representação quadripolo, localizado nos extremos do quadrado apresentado na modelagem. Buscando os valores para V_s e I_s , a seguinte formulação é obtida:

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma\ell) & Z_c \sinh(\gamma\ell) \\ Y_c \sinh(\gamma\ell) & \cosh(\gamma\ell) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

2.3 Modelo Nominal Série

Após a separação dos parâmetros na representação quadripolo, como em 2.5, algumas representações de circuitos de linhas de transmissão podem ser extraídas de acordo com a natureza de cada modelo de linha. Na equação 2.6, temos um modelo que considera **parâmetros distribuídos**. Este trabalho considerou o modelo **Nominal Série**, que dispensa as correções hiperbólicas e valores de propagação contidos na equação de parâmetros distribuídos. O foco neste modelo se deve ao fato de este ser o disponível no momento na Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista - CTEEP e, mesmo com suas simplificações inerentes, possibilitou resultados interessantes. Desse modo, as constantes ABCD assumem os seguintes valores:

$$A = D = 1 \quad (2.7)$$

$$B = Z_n \quad (2.8)$$

$$C = 0 \quad (2.9)$$

$$(2.10)$$

Onde:

$$Z_n = Z\ell \quad (2.11)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}}$$

O que resulta nas seguintes equações:

$$V_r = V_s - Z_n I_s \quad (2.12)$$

$$I_r = I_s$$

2.4 Linhas de Transmissão Trifásicas

O sistema trifásico é um formato muito difundido no desenvolvimento de mecanismos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, Saha et al. [2010], ONS [2013]. Ele consiste na disposição de três ondas senoidais denotadas por A, B e C defasadas em 120° uma da outra. A figura 2.4 descreve a disposição das fases na linha.

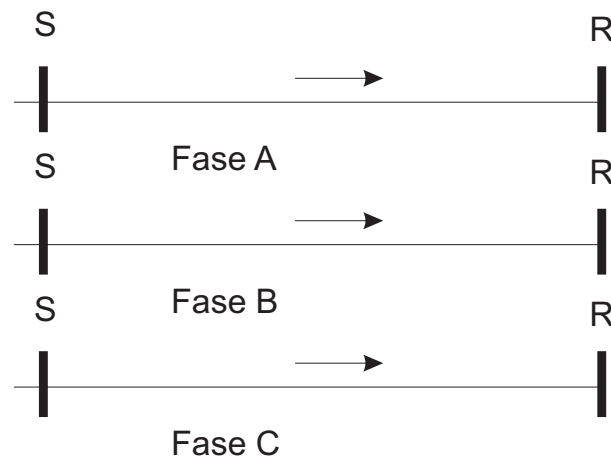


Figura 2.4 Linha de Transmissão Trifásica.

2.5 Processamento de Sinais

Para efeito de análise do circuito da linha, medições contínuas de oscilografia para tensão e corrente são monitoradas para todas as fases da mesma. Em condições normais, as medições dos sinais apresentam um formato descrito dentro de um padrão, chamado estado permanente. A ocorrência de anomalias no funcionamento das linhas - como as faltas - afetam o formato do sinal registrado.

A figura 2.5 ilustra a medição de sinais em um período em que uma falta ocorre. A partir da região marcada em vermelho, é possível perceber uma variação no formato do sinal registrado, o que representa o início da falta ou o fim do estado permanente. Portanto, é possível a partir de tais dados extrair informações que possam ser úteis para uma análise de falta.

Porém, a análise simples dos dados brutos pode acarretar alguns efeitos indesejáveis como um maior custo computacional ou a perda de informações importantes e não detectadas por conta da representação inadequada. Desse modo, algumas representações são introduzidas no problema, sendo descritas nas subseções seguintes.

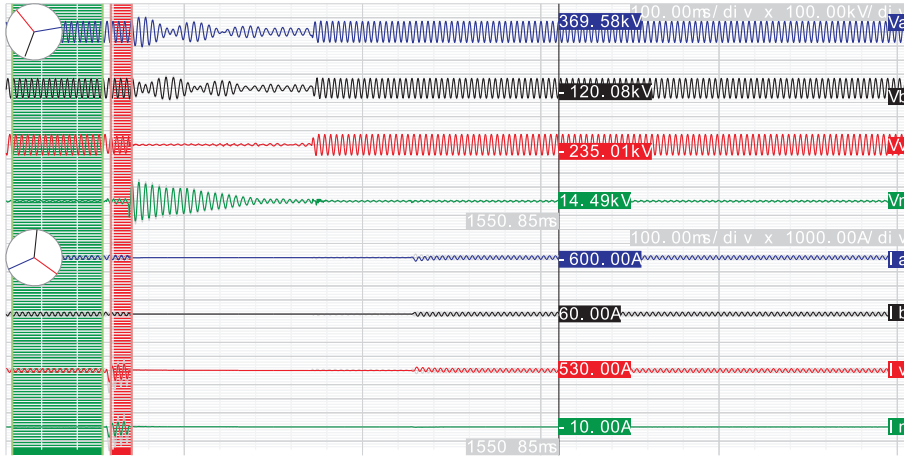


Figura 2.5 Oscilografia de uma ocorrência de falta - domínio do tempo.

2.5.1 Representação Fasorial

A medição descrita anteriormente, realizada a partir de dados de oscilografia, ocorre em função do tempo, ou seja, registra a intensidade de cada sinal em intervalos subsequentes de tempo. De maneira simplificada, tal registro pode ser descrito como em (2.13).

$$s(t) = s_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (2.13)$$

Onde, dado um sinal s em função do tempo t em segundos, s_m é a amplitude do sinal, φ é a fase e $\omega = 2\pi f$ corresponde à frequência angular fundamental em rad/s . Tal representação se baseia na premissa de que os valores registrados a cada instante seguem o formato de uma onda senoidal, a exemplo do apresentado para as linhas de transmissão nas seções anteriores.

A representação fasorial se baseia nesse aspecto a respeito do formato dos sinais para propor uma simplificação que elimina a necessidade de consideração de todos os valores registrados a cada intervalo. A representação consiste na substituição das informações de intensidade instantânea do sinal pelas informações de amplitude e fase, sendo estes os parâmetros que indicam o formato da onda senoidal presente na compo-

nente fundamental do sinal durante o momento. Portanto, a equação apresentada em 2.13 é substituída por:

$$s(t) = \Re\{s_m e^{j(\omega t + \varphi)}\} \quad (2.14)$$

A figura 2.6 descreve no domínio fasorial a falta apresentada na figura 2.5. É possível observar que o período de falta é igualmente destacado na medição, com a vantagem de uma representação mais simples do sinal medido.

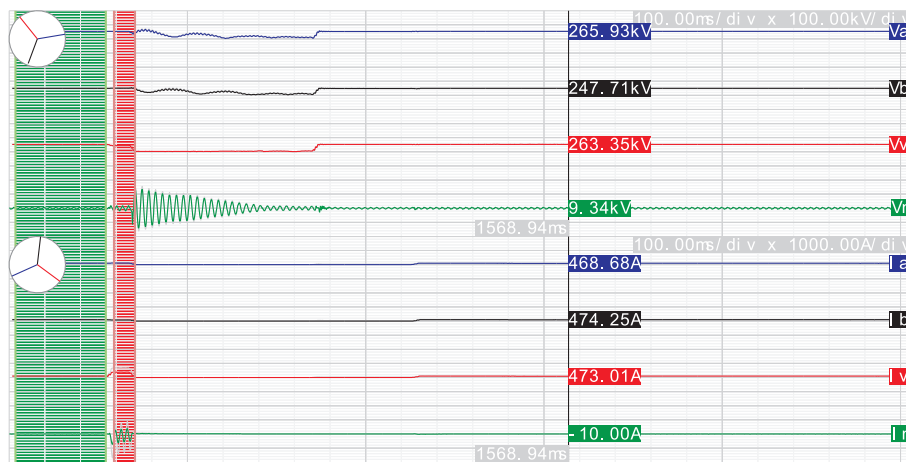


Figura 2.6 Oscilografia de uma ocorrência de falta - domínio fasorial.

O processo de definição das componentes descritoras do sinal, denominado **estimação fasorial**, pode ser realizado com boa precisão para sinais de boa qualidade registrados em condições normais de funcionamento do circuito, a partir da avaliação de um ciclo da medição. Porém, na presença de ruídos ou anomalias, tais valores podem ser distorcidos, prejudicando o processo de estimação e consequentemente toda a análise do problema em questão. Tal questão ressalta a importância de se utilizar uma técnica eficiente de estimação de fasores para que esta não prejudique posteriormente o processo de análise de falta em si.

2.5.1.1 Estimação Fasorial

A técnica utilizada para a estimação fasorial se fundamenta na análise do sinal registrado em função do tempo $s(t)$ para a obtenção não somente da amplitude s_m e a fase φ , mas também dos valores equivalentes dessas componentes em seu terceiro harmônico, s_3 e φ_3 , e ainda o *offset* b e a inclinação a do sinal. Desse modo, temos a seguinte equação:

$$\begin{aligned}
s(t) &= s_m \cos(\omega t + \varphi) + s_3 \cos(3\omega t + \varphi_3) + at + b \\
&= s_m \cos(\omega t) \cos(\varphi) - s_m \sin(\omega t) \sin(\varphi) + s_3 \cos(3\omega t) \cos(\varphi_3) - s_3 \sin(3\omega t) \sin(\varphi_3) + at + b \\
&= x \cos(\omega t) - y \sin(\omega t) + x_3 \cos(3\omega t) - y_3 \sin(3\omega t) + at + b
\end{aligned} \tag{2.15}$$

Onde a equação inicial é simplificada em termos dos seguintes fatores:

$$x = s_m \cos \varphi \tag{2.16}$$

$$y = s_m \sin \varphi \tag{2.17}$$

$$x_3 = s_3 \cos \varphi_3 \tag{2.18}$$

$$y_3 = s_3 \sin \varphi_3 \tag{2.19}$$

Desse modo, é obtido um sistema de equações lineares em termos de x , x_3 , y , y_3 , a e b , sendo então possível resolver o problema através de uma formulação do método dos Mínimos Quadrados para uma janela de k amostras centralizada na amostra i . O valor de k é estabelecido em função tamanho de um período completo do sinal e o intervalo Δt entre as medições de modo que possa constituir uma janela que consiga representar um ciclo completo.

$$\begin{bmatrix} \cos(\omega t_{i-\underline{k}}) & -\sin(\omega t_{i-\underline{k}}) & \cos(3\omega t_{i-\underline{k}}) & -\sin(3\omega t_{i-\underline{k}}) & t_{i-\underline{k}} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos(\omega t_{i+\bar{k}}) & -\sin(\omega t_{i+\bar{k}}) & \cos(3\omega t_{i+\bar{k}}) & -\sin(3\omega t_{i+\bar{k}}) & t_{i+\bar{k}} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ x_{3,i} \\ y_{3,i} \\ a_i \\ b_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{i-\underline{k}} \\ \vdots \\ s_{i+\bar{k}} \end{bmatrix} \tag{2.20}$$

onde $\underline{k} = \lfloor (k-1)/2 \rfloor$ e $\bar{k} = \lfloor k/2 \rfloor$.

A estimação por mínimos quadrados tem como vantagem se tornar um filtro natural para eventuais ruídos na medição. Isso ocorre porque no processo de estimação, diante das amostras avaliadas nas janelas, serão assimilados os valores de interesse, enquanto que os ruídos entrarão no montante apontado como erro e que, pela própria natureza do método, tem como objetivo ser minimizado.

2.5.2 Representação por Componentes Simétricas

O circuito elétrico de uma linha trifásica apresenta um fenômeno que proporciona uma maior complexidade no cálculo dos valores presentes em sua formulação. Trata-se da **impedância mútua**, que aparece devido ao acoplamento eletromagnético entre as fases do circuito, conforme esquematizado em 2.7.

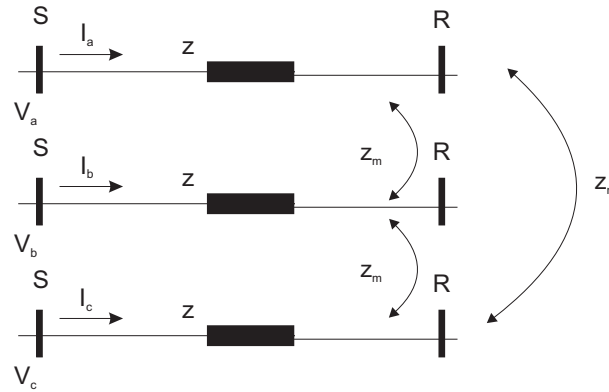


Figura 2.7 Linha de Transmissão Trifásica - Efeito de Impedância mútua

Desse modo, tem-se um cálculo dos valores de tensão e corrente influenciado por fatores externos decorrentes da corrente das demais fases. Para uma linha balanceada e transposta, a matriz de impedância que descreve os valores de cada fase z e os valores gerados a partir do efeito de impedância mútua z_m apresenta uma disposição conforme indicada em (2.21).

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z & z_m & z_m \\ z_m & z & z_m \\ z_m & z_m & z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

A equação evidencia uma igualdade entre os valores presentes na diagonal, assim como outra para os valores que se encontram fora dela. Há, no entanto, o contratempo de se calcular os valores apontados pelo efeito, tornando a análise do circuito mais complexa. A utilização de uma representação por componentes simétricas diante de um cenário semelhante ao citado elimina os efeitos observados pela impedância mútua, a partir da aplicação de uma matriz de transformação A aos valores originais:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} V_z \\ V_p \\ V_n \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Sendo $\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ um valor correspondente à defasagem de 120° entre as fases.

Aplicada a transformação, as componentes resultantes, denotadas por z , p e n , descrevem uma nova representação que reduz o problema da impedância mútua resultante do acoplamento entre os circuitos:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z & z_m & z_m \\ z_m & z & z_m \\ z_m & z_m & z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

↓

$$\begin{bmatrix} V_z \\ V_p \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_z & 0 & 0 \\ 0 & z_p & 0 \\ 0 & 0 & z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_z \\ I_p \\ I_n \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Desse modo, a representação por componentes simétricas auxilia na análise do circuito ao permitir um desacoplamento do circuito original em três circuitos desacoplados, conforme ilustrado na Figura 2.8. Vale destacar, no entanto, que tal abordagem é aplicável a linhas de transmissão perfeitamente transpostas, onde a matriz de impedâncias pode ser representada de forma equilibrada, ou seja, com os valores das diagonais iguais entre si e também nos elementos fora da mesma, como ilustrado em (2.24) e mencionado em Silveira [2007]. Tal comportamento contribui para a elaboração de circuitos desacoplados representados pelas componentes. No caso de linhas não transpostas, tal cenário não ocorre e, conseqüentemente, o circuito final obtido na representação não é desacoplado, como mencionado em Blackburn [1993].

2.5.3 Análise do Sinal nos domínios de Tempo e Frequência

As subseções anteriores abordaram a representação de sinais de oscilografia originalmente registrados no tempo em função de parâmetros descritores de suas frequências durante certos intervalos avaliados. Se tal abordagem pode auxiliar na identificação de mudanças de estado e fornecer informações relevantes para a análise de falta a partir de

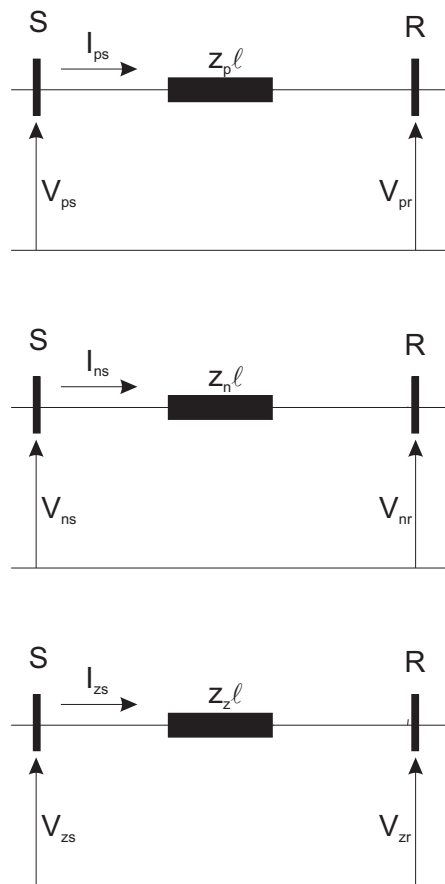


Figura 2.8 Circuito representado por Componentes Simétricas

um volume de dados reduzido, ocorre em contrapartida uma tendência de suavização dos valores observados em estados transitórios, causado pelas técnicas de estimação aplicadas. Desse modo, informações apresentadas nos instantes iniciais da falta podem ser perdidas. Como alternativa para a avaliação de tais períodos são utilizadas representações que mantêm informações dos domínios de tempo e frequência após a transformação do sinal. Na subseção seguinte é apresentada uma dessas técnicas, a transformada *Wavelet*, que também é aplicada na análise de faltas deste trabalho.

2.5.3.1 A Transformada *Wavelet*

A aplicação de uma transformada *Wavelet* no período transitório registrado na oscilografia a partir do momento de início da falta apresenta informações importantes a serem aplicadas em problemas de localização e classificação da falta quanto a sua natureza elétrica, conforme discutido em Fernandez & Rojas [2002]. Isso ocorre pela sua característica de decompor um sinal em múltiplas escalas nos domínios da frequência e do tempo, auxiliando melhor no processo decisório elaborado para o problema em

foco. A função utilizada para a transformação é dada pela seguinte fórmula:

$$\psi_{g,h}(t) = 2^{\frac{g}{2}} \psi(2^g t - h) \quad (2.26)$$

Onde ψ é a função *wavelet-mãe*. Desse modo, um sinal em função do tempo $s(t)$ pode ser decomposto como em 2.27:

$$s(t) = \sum_{g,h} c_{g,h} \psi_{g,h}(t) \quad (2.27)$$

Onde $c_{g,h}$ são os coeficientes da transformada, g é um fator de escala e h um fator de translação. O fator de escala se refere a uma contração ou dilatação do sinal avaliado, enquanto que a translação realiza um deslocamento na análise do sinal com o objetivo se localizar uma janela desejada de análise. Tais fatores auxiliam na detecção de informações locais de um sinal.

A transformada *Wavelet* pode ser aplicada tanto para um intervalo discreto quanto um contínuo. Como a análise de faltas realizada neste trabalho considera como entrada registros intervalados dos sinais de oscilografia, foi aplicada a transformada discreta (do inglês *Discrete Wavelet Transform - DWT*) implementada no *Wavelet Toolbox* do Matlab [Misiti et al., 2004], sendo utilizada a **Daubechies 4** como função *Wavelet-mãe*, Daubechies [1998]. Segundo avaliação citada em Ekici [2012], esta função possui maior similaridade com os formatos presentes nos períodos de falta.

A decomposição realizada pela transformada separa o sinal processado em duas novas componentes: **aproximação** e **detalhe**, sendo que a primeira concentra as componentes de baixa frequência e a segunda as de frequência mais alta, conforme ilustrado na Figura 2.9. Na transformada *Wavelet* original, esse processo pode ocorrer recursivamente a partir da utilização dos valores retornados pela componente de aproximação como entrada para a próxima aplicação da DWT. Desse modo, os resultados das transformações são associados a níveis, sendo de nível 1 as componentes retornadas pela DWT aplicada ao sinal original, nível 2 os valores gerados a partir da componente de aproximação de nível 1 e assim por diante. A Figura 2.10 demonstra um exemplo de decomposição em múltiplos níveis.

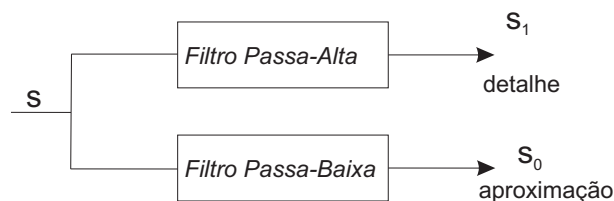


Figura 2.9 Decomposição de Sinal a partir de Transformada Wavelet.

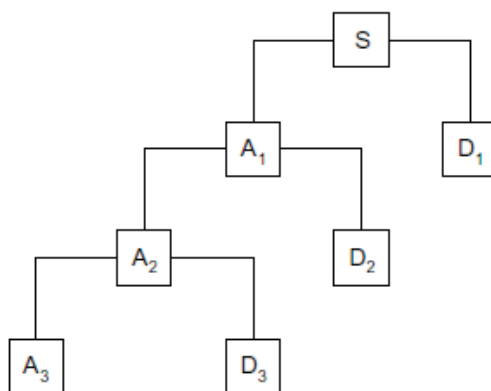


Figura 2.10 Decomposição de Multinível do Sinal a partir de Transformada Wavelet.

Capítulo 3

Localização de Falhas

3.1 O Problema de Localização de Falhas

O problema de localização de falhas em linhas de transmissão consiste em identificar uma região onde ocorreu um curto-circuito a partir de anomalias registradas nas linhas. Esse cálculo é de grande valia para empresas fornecedoras de energia, uma vez que, ao fornecer um direcionamento do local do problema, contribui para que este possa ser resolvido com maior rapidez, aumentando assim a confiabilidade do serviço prestado, além de reduzir custos para a empresa no processo.

Para se realizar o cálculo da distância, diversos algoritmos foram propostos com o intuito de se oferecer uma resposta cada vez mais precisa e instantânea. Dentre eles, existem abordagens que consideram informações de apenas um dos terminais da linha de transmissão, como a técnica proposta por Takagi et al. [1982], ou ainda técnicas como as de Girgis et al. [1992] e Johns & Jamali [1990], que utilizam informações dos dois terminais que compõem a linha. Estas abordagens têm em comum o fato de utilizarem valores de tensão e corrente medidas nos terminais, além de parâmetros da linha, como componentes de impedância e constantes de propagação.

A técnica de Silveira [2007] também considera dois terminais, porém representa o problema numa formulação que traduz a questão da localização de falta para um problema de otimização. Também partindo da avaliação de dois terminais, a técnica de Radojevic et al. [2009] se destaca por não utilizar parâmetros de linha para a localização da falta, se baseando somente nas medidas de tensão e corrente dos terminais sincronizados. O método proposto por Vieira et al. [2013a] apresenta modificações na formulação apresentada por Radojevic et al. [2009] para a corrigir a questão do sincronismo. No método de Tizouvaras et al. [2001] também são utilizados dados de dois terminais sem necessidade de sincronismo entre os terminais. Vieira et al. [2013b]

propuseram uma solução para linhas não-transpostas e sem sincronismo a partir da representação fasorial de suas componentes.

As seções a seguir descrevem em maiores detalhes algumas das abordagens citadas e apresentam um novo método de localização de faltas.

3.2 Revisão Bibliográfica

3.2.1 Development of a new type fault locator using the one terminal voltage and current data - 1982 - K. Takagi and Y. Yomakoshi and M. Yamaura and R. Kondow and T. Matsushima - Takagi et al. [1982]

O método de Takagi et al. [1982] utiliza dados de somente um terminal. O cálculo da localização da falta usando somente dados de um terminal pode se tornar uma vantagem se os dados da medição do outro terminal não puderem ser obtidos ou estiverem corrompidos.

O método foi desenvolvido considerando o modelo monofásico da linha de transmissão, sendo os cálculos realizados com as grandezas de fase. Com base na formulação desenvolvida, a tensão da linha no ponto da falta pode ser calculada segundo:

$$V_f(\ell_S) = R_f I_f \quad (3.1)$$

Considerando:

$$I_f = I_s^{PoF} + I_r^{PoF} \quad (3.2)$$

Chega-se a:

$$V_f(\ell_S) = R_f I_s^{PoF} \left[1 + \frac{I_r^{PoF}}{I_s^{PoF}} \right] \quad (3.3)$$

Reordenando a equação:

$$\frac{V_f(\ell_S)}{I_s^{PoF}} = R_f \left[1 + \frac{I_r^{PoF}}{I_s^{PoF}} \right] \quad (3.4)$$

Onde I_s^{PoF} e I_r^{PoF} indicam as correntes no circuito puro de falta com direção aos terminais S e R , respectivamente. As correntes de um circuito puro de falta são obtidas tomando-se os valores de corrente observados durante o período de falta e subtraindo-os pelos valores do período pré-falta. A razão $\frac{I_r^{PoF}}{I_s^{PoF}}$ representa o fator de distribuição de corrente de falta. No trabalho de Takagi et al. [1982], é assumido que este valor é real, de modo a simplificar o cálculo a partir da avaliação da componente imaginária

da formulação, denotada por \Im . Considerando que a linha é representada pelo seu modelo impedância nominal série tem-se que:

$$\Im \left(\frac{V_f(\ell_S)}{I_s^{PoF}} \right) = \Im \left(\frac{V_s - \ell_S Z I_s}{I_s^{PoF}} \right) = 0 \quad (3.5)$$

E, por fim:

$$\ell_S = \frac{\Im \left(\frac{V_s}{I_s^{PoF}} \right)}{\Im \left(\frac{Z I_s}{I_s^{PoF}} \right)} \quad (3.6)$$

Sendo \Im representa a componente imaginária da grandeza calculada. A metodologia proposta por Takagi et al. [1982] é atrativa por ser simples e não precisar de comunicação entre os terminais. Contudo, os métodos que utilizam medições de dois terminais são mais exatos.

3.2.2 New Multi-Ended Fault Location Design for Two - or Three - Terminal Lines - 2001 - D. A. Tizouvaras and J. Roberts and G. Benmouyal - Tizouvaras et al. [2001]

O método desenvolvido por Tizouvaras et al. [2001] é imune à erros no sincronismo dos sinais dos terminais da linha e além disso não necessita de métodos iterativos para calcular os defasamentos entre tais sinais. Tal característica torna esse método independente de sistemas de sincronia de dados que são geralmente caros e complexos, conforme descrito em Radojevic et al. [2009].

O algoritmo de Tizouvaras et al. [2001] pode ser deduzido através da Figura 3.1. Nessa figura, é mostrada a ligação dos circuitos de sequência para uma falta AT (fase A-Terra). A ideia básica do método é comparar o módulo da tensão no ponto da falta na malha de sequência negativa calculando V_f visto do terminal S e visto de R.

$$\begin{aligned} \text{terminal } S : V_{nf} &= -I_{ns}(z_{ns} + \ell_S z_n) \\ \text{terminal } R : V_{nf} &= -I_{nr}(z_{nr} + (\ell - \ell_S)z_n) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Tomando o módulo de 3.7 chega-se a uma equação do segundo grau na qual uma das raízes é a distância da falta procurada. A equação quadrática resulta da fórmula abaixo:

$$|I_{nr}| = \left| \frac{I_{ns}(z_{ns} + \ell_S z_n)}{z_{nr} + (\ell - \ell_S)z_n} \right| \quad (3.8)$$

Interessante destacar nesse método é que ele utiliza somente grandezas de sequência negativa e por isso não é afetado pelo acoplamento mútuo de sequência zero. Ele também não utiliza grandezas pré-falta e pode ser aplicado a linhas com três terminais.

3.2.3 New Approach for Fault Location on Transmission Lines Not Requiring Line Parameters - 2009 - Z. M. Radojevic and C. H. Kim and M. Popov and G. Preston and V. Terzija - Radojevic et al. [2009]

A técnica proposta por Radojevic et al. [2009] se destaca por não considerar parâmetros de linha em sua formulação, sendo esta baseada somente nas componentes simétricas dos terminais que compõem a linha, como mostrado na Figura 3.1, que ilustra o diagrama de sequência para uma falta fase-terra ocorrida a uma distância ℓ_S do terminal S. A linha possui tamanho ℓ e z_p , z_n e z_z são respectivamente as impedâncias nominal série de sequência positiva, negativa e zero.

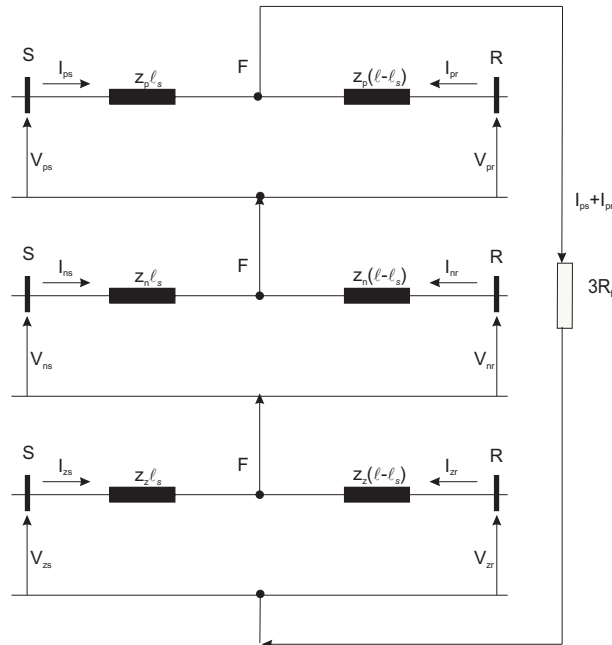


Figura 3.1 Circuito Pós-Falta representado pelas componentes de seqüência.

A partir dos fasores de corrente e tensão, é possível determinar suas componentes de seqüência positivas, negativas e zero, como discutido em Oliveira et al. [1996]. É

objetivo do algoritmo calcular um valor percentual da distância da falta com relação ao tamanho total da linha, ℓ :

$$\ell_s \% = \frac{\ell_s}{\ell} 100 \quad (3.9)$$

Com base em 3.9 e partindo da premissa que, para uma linha totalmente transposta tem-se que $z_n = z_p$, é aplicada a lei das Tensões de Kirchhoff nas malhas de sequência positiva e negativa chegando-se à formulação para o cálculo do percentual citado:

$$\ell_s = \frac{(V_{ps} - V_{pr})I_{nr} - (V_{ns} - V_{nr})I_{pr}}{(V_{ps} - V_{pr})(I_{ns} + I_{nr}) - (V_{ns} - V_{nr})(I_{ps} + I_{pr})} \quad (3.10)$$

Onde V indica a tensão e I a corrente. Os sobrescritos p e n indicam componentes positivas e negativas, respectivamente, e os subscritos S e R se referem aos terminais de envio e recebimento. O desenvolvimento da fórmula apresentada pode ser visto com maiores detalhes em Radojevic et al. [2009].

Contudo, o método de Radojevic et al. [2009] tem sua exatidão muito influenciada pela sincronia nas medições de tensão e corrente feitas nos terminais S e R. O próximo método tenta contornar essa deficiência.

3.2.4 A closed form solution for transmission line fault location without the need of terminal synchronization or line parameters - 2013 - D. A. G. Vieira and D. B. Oliveira and A. C. Lisboa - Vieira et al. [2013a]

O método desenvolvido por Vieira et al. [2013a] se baseia na formulação apresentada por Radojevic et al. [2009], mas com a inclusão de novos elementos para solucionar o problema de sensibilidade ao sincronismo apresentado neste. Para tanto, a equação apresentada em (3.10) é reformulada para destacar a defasagem do sincronismo. É inserida um novo fator, $y = e^{j\theta}$, sendo θ um ângulo de defasagem entre os sinais. Na formulação, o termo y é associado aos componentes do terminal R , deixando a equação no seguinte formato:

$$\ell_s = \ell \frac{(V_{ps} - yV_{pr})yI_{nr} - (V_{ns} - yV_{nr})yI_{pr}}{(V_{ps} - yV_{pr})(I_{ns} + yI_{nr}) - (V_{ns} - yV_{nr})(I_{ps} + yI_{pr})} \quad (3.11)$$

Adicionalmente, uma nova equação é elaborada a partir da premissa que a distância da falta ℓ_s é um valor puramente real, o que é equivalente a se extrair o complexo conjugado ℓ_s^* de ℓ_s :

$$\ell_s - \ell_s^* = 0. \quad (3.12)$$

Desse modo, é montado um sistema de equações de quarta ordem em termos somente da defasagem de sincronismo, que pode ser resolvido de maneira analítica. Dado que o sistema retorna quatro raízes, a solução correta para o problema é apontada com base na análise da impedância estimada no período pré-falta e os possíveis ângulos de sincronização dos sinais. Os resultados apresentados para o método destacam a precisão das soluções para diferentes defasagens de sincronismo entre os terminais. Alguns casos reais de falta também são avaliados, gerando resultados com baixo percentual de erro. Desse modo, o método une a vantagem de não depender de parâmetros de linha com a tolerância a diferenças no sincronismo. Deve ser ressaltado, no entanto, que este, por utilizar componentes simétricas, é mais indicado para linhas transpostas.

3.3 Método de Localização baseado em Estimativa por Mínimos Quadrados - MLEMQ

A técnica para localização de faltas proposta neste trabalho se baseia na representação do circuito pós-falta em uma formulação que transforma o problema em uma função objetivo, cuja solução corresponde à informação sobre localização buscada. Nas subseções seguintes são detalhados alguns conceitos que envolvem a representação citada, além da técnica de otimização baseada no Método dos Mínimos Quadrados aplicada ao problema.

3.3.1 Formulação do Problema

A representação do circuito em função de algumas medições nos terminais, parâmetros da linha e informações da falta foi formulada com base no trabalho descrito por Silveira [2007]. Nessa formulação, o circuito é representado em suas componentes de sequência Oliveira et al. [1996] conforme mostrado na Figura 3.1 para uma falta AT.

A partir dessa nova representação e com base na lei das tensões de Kirchhoff, é possível extrair a seguinte função do circuito descrito acima:

$$V_{ns} + V_{ps} + V_{zs} - \ell_S z_p (I_{ps} + I_{ns}) - \ell_S z_z I_{zs} - 3R_f (I_{ps} + I_{pr}) = 0 \quad (3.13)$$

onde R_f é a impedância da falta.

Adicionando e subtraindo $\ell_S z_p I_{zs}$ da função, temos:

$$\begin{aligned} V_{ps} + V_{ns} + V_{zs} - \ell_S Z_p I_{zs} - \ell_S Z_p (I_{ps} + I_{ns}) - \dots \\ \ell_S Z_z I_{zs} + \ell_S Z_p I_{zs} - 3R_f (I_{ps} + I_{pr}) = 0. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Reorganizando os termos:

$$V_{ns} + V_{ps} + V_{zs} - \ell_S z_p (I_{ps} + I_{ns} + I_{zs}) - \ell_S I_{zs} (z_z - z_p) - 3R_f (I_{ps} + I_{pr}) = 0 \quad (3.15)$$

E considerando:

$$V_{ns} + V_{ps} + V_{zs} = V_S$$

$$I_{ps} + I_{ns} + I_{zs} = I_S$$

Temos a seguinte simplificação da fórmula:

$$V_S - \ell_S z_p (I_S + \frac{(z_z - z_p)}{z_p} I_{zs}) - 3R_f (I_{ps} + I_{pr}) = 0 \quad (3.16)$$

Considerando em 3.16 que V_S seja a parte medida V_S^M da igualdade e o restante a parte calculada V_S^C , é possível afirmar que, ao se encontrar valores de distância ℓ_S e impedância da falta R_f que satisfaçam a igualdade, estes representarão as soluções para o problema de localização:

$$\begin{aligned} V_S^M &= V_S \\ V_S^C &= \ell_S z_p (I_S + \frac{(z_z - z_p)}{z_p} I_{zs}) - 3R_f (I_{ps} + I_{pr}) \\ V_S^M - V_S^C &= 0 \end{aligned} \quad (3.17)$$

3.3.2 Localização de Faltas como um problema de otimização

A partir da formulação representada em 3.17, o problema de localização de faltas pode ser visto como um problema de Otimização, onde se busca como solução ótima os

valores de distância e impedância da falta que retornem a menor diferença possível entre os valores medidos V_S^M e calculados V_S^C . Originalmente, a busca pela solução ótima proposta em Silveira [2007] foi feita utilizando o algoritmo Elipsoidal, como proposto em Grotschel et al. [1988]. Já neste trabalho, tal busca é realizada através do método dos Mínimos Quadrados, discutido em Belegundu & Chandrupatla [2011].

A nova abordagem traz como diferencial a possibilidade de se resolver o problema de maneira analítica, ao passo que, na anterior, a obtenção da solução era realizada a partir de um processo iterativo. Outro ponto a ser destacado na técnica aqui proposta é a utilização de uma janela de medições do sinal. Dado que o método dos Mínimos Quadrados busca uma solução cuja distância entre o valores estimado e observado seja a menor possível, tem-se na avaliação de uma janela de medição uma solução composta por um conjunto de valores que busca a mitigação da soma de resíduos, sendo estes representados em grande parte por ruídos no sinal.

Inicialmente, a função objetivo foi modelada de modo a buscar valores de distância e impedância de falta que minimizassem a soma das diferenças entre a parte medida e a calculada de todas as observações realizadas, elevadas ao quadrado. Ou seja, dado:

$$e = V_S^M - V_S^C \quad (3.18)$$

Temos um problema de otimização definido por:

$$\min F(\ell_s, R_f) = |V_s^M - V_s^C|^2 \quad (3.19)$$

No intervalo observado para a localização de faltas, várias medições são realizadas. Assim, considerando a formulação descrita em 3.17, a função objetivo pode ser representada através dos seguintes vetores e matrizes:

$$F(\ell_s, R_f) = e^T e$$

onde $e = v - Cd$

$$v = \begin{bmatrix} \Re(V_{s1}) \\ \Im(V_{s1}) \\ \vdots \\ \Re(V_{sk}) \\ \Im(V_{sk}) \end{bmatrix}, d = \begin{bmatrix} \ell_s \\ R_f \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} \Re(Z_p(I_{s1} + \frac{(Z_z - Z_p)}{Z_p} I_{zs1})) & \Re(3(I_{ps1} + I_{pr1})) \\ \Im(Z_p(I_{s1} + \frac{(Z_z - Z_p)}{Z_p} I_{zs1})) & \Im(3(I_{ps1} + I_{pr1})) \\ \vdots & \vdots \\ \Re(Z_p(I_{sk} + \frac{(Z_z - Z_p)}{Z_p} I_{zsk})) & \Re(3(I_{psk} + I_{prk})) \\ \Im(Z_p(I_{sk} + \frac{(Z_z - Z_p)}{Z_p} I_{zsk})) & \Im(3(I_{psk} + I_{prk})) \end{bmatrix}$$

Onde \Re e \Im são, respectivamente, as partes real e imaginária da componente simétrica. Dados que a função e é linear, temos que a função $F(\ell_s, R_f)$ é quadrática. Com isso, ao igualarmos o gradiente de $F(\ell_s, R_f)$ a zero, é obtido o ponto ótimo para a solução.

$$\nabla F(\ell_s, R_f) = 0 \quad (3.20)$$

Simplificando a equação, torna-se um problema linear, sendo a solução obtida a partir do cálculo do vetor d , conforme abaixo:

$$d = (C^T C)^{-1} C^T v \quad (3.21)$$

Onde é utilizado o termo $(C^T C)^{-1} C^T$ para a obtenção da pseudoinversa de C .

A evolução do modelo para uma resolução da fórmula de maneira analítica através da Estimativa por Mínimos Quadrados foi conduzida ao longo dos trabalhos realizados nesta dissertação, sendo consolidada na submissão de um artigo sobre localização faltas citado na seção 1.3. Outro ponto também avaliado de fundamental importância para a formulação se concentra na questão da estimação dos dados utilizados no cálculo, descrita em maiores detalhes na subseção seguinte.

3.3.3 Escolha da Janela de Medição

Nos elementos apresentados na equação 3.20 é citada a variável k que representa o número de amostras de medição utilizadas na solução do problema. A definição do tamanho da janela de medição é um passo importante na execução do método proposto. O critério adotado para a escolha é análogo ao discutido na seção 2.5.1.1, onde se destaca a escolha de uma janela k que contenha um número de amostras que componham um ciclo completo da frequência fundamental. Para o problema em questão, é realizada dentro do período de ocorrência da falta uma busca por uma janela k com centro no momento t_i cujo erro de reconstrução do fasor seja o mínimo. A equação 3.22 descreve a soma dos erros percentuais de reconstrução, calculados a partir da diferença entre o valor de um fasor de corrente i e seu valor estimado \tilde{i} , divididos pela amplitude do sinal i_m quando calculados dentro de uma janela centrada em t_i .

$$\varepsilon(t_i) = \sum_{\tau=t_i-k/2}^{t_i+k/2} \frac{(i(\tau) - \tilde{i}(\tau))^2}{i_m(\tau)}. \quad (3.22)$$

A busca pela janela de menor erro de reconstrução tende a evitar o período transitório e concentrar as medições analisadas em um intervalo contido no estado permanente da falta por conta do volume de erro em cada estágio. Portanto, tem-se uma medição baseada em componentes com valores mais confiáveis, o que permite uma solução com melhor precisão. A Figura 3.2 destaca a diferença entre os erros de reconstrução observados em estados transitórios e permanentes da falta. É possível avaliar que os maiores valores de erro estão localizados nos limites do evento de falta, ou seja, nos estados transitórios.

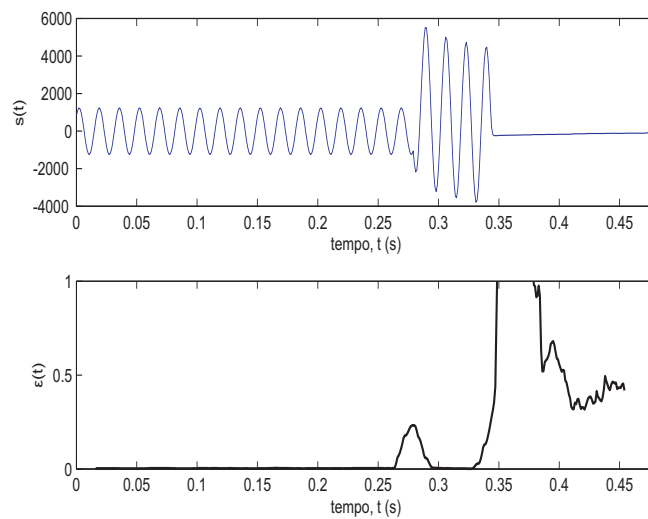


Figura 3.2 Erro $\varepsilon(t)$ de reconstrução fasorial.

Capítulo 4

Classificação de Faltas

4.1 Classificação de Faltas quanto ao Evento Causador

Na análise de faltas em linhas de transmissão, alguns estudos são concentrados no problema de localização de faltas, conforme discutido no capítulo 3. Há também outra linha de pesquisa que se baseia na classificação de faltas com base em suas naturezas elétricas, como fase-terra, fase-fase, dentre outras. Um ponto em comum em ambos os processos descritos é a avaliação de medidas de tensão e corrente, registradas ao longo do período de ocorrência da falta e também nos momentos que a antecedem. Do processamento desses sinais, através de diferentes técnicas, são extraídos padrões que podem proporcionar informações relevantes para o problema em questão.

Este capítulo foca em uma modalidade de análise de falta ainda pouco explorada, que é a classificação do evento causador. Mais especificamente, são tratados neste trabalho casos de faltas ocasionadas por descarga elétrica e queimadas. Uma vez que há poucas referências na literatura sobre o tema que indiquem informações de falta com boa correlação com o evento causador, a proposta consiste em examinar algumas dessas informações extraídas de processamento de sinais e aplicá-las, na condição de características, a um modelo baseado em técnicas de Inteligência Computacional. No trabalho foram escolhidas para a avaliação características amplamente utilizadas em problemas de localização de faltas e classificação quanto à natureza elétrica, sendo apontadas as mais relacionadas com os fenômenos mencionados. Este processo é realizado com o auxílio de uma ferramenta de seleção de características, cujo desempenho é avaliado a partir de um modelo classificatório baseado no método de Máquinas de Vetores de Suporte (do inglês *Support Vector Machines* - SVM).

A seção seguinte apresenta alguns trabalhos em classificação de faltas e análise de causas de falta, cujos mecanismos de extração de características e classificação de falta serviram de base para o modelo apresentado neste trabalho. Além dos citados, são também consideradas informações já examinadas no trabalho para o problema de localização de faltas, na seção 3. Em seguida, são detalhados as características utilizadas, o processo de seleção das mesmas e o modelo SVM aplicado ao problema.

4.2 Revisão Bibliográfica

4.2.1 Intelligent approaches using support vector machine and extreme learning machine for transmission line protection - 2010 - V. Malathi, N.S. Marimuthub, S. Baskar - Malathi et al. [2010]

O trabalho de Malathi et al. [2010] propõe soluções para a análise de faltas que se assemelham pela utilização de transformadas *Wavelet* (descritas em maiores detalhes na subseção 2.5.3.1), na fase de extração de características. No entanto, nos processos de regressão e classificação algumas soluções utilizam o método *Extreme Learning Machine - ELM*, Huang et al. [2006], enquanto outras aplicam ao problema *Support Vector Machines - SVM*, descrito em Bishop [2006].

São avaliadas medidas de tensão e corrente registradas em função do tempo, sendo estas processadas a partir de uma transformação *Wavelet* de nível 1 com a utilização de uma função de Daubechies como *wavelet-mãe*. No processo de escolha da função, foi realizada no trabalho uma avaliação preliminar entre quatro funções de Daubechies (db1, db2, db3 e db4), sendo **db2** a escolha que apresentou melhores resultados.

Transformados os sinais, primeiramente são gerados modelos ELM ou SVM treinados a partir de uma base com amostras de corrente de faltas simuladas para a detecção das fases em falta. Nos modelos, são definidos três ELMs ou três SMVs, sendo cada um direcionado para uma fase do circuito em análise. De maneira similar, é treinado em seguida um ELM ou SVM por fase para a classificação da falta quanto à natureza elétrica. Para definir a classe da falta em questão, o modelo ainda combina o resultado do classificador com um modelo à parte para a detecção de existência do terra na falta. O modelo basicamente utiliza a seguinte equação:

$$Indice = \frac{|I_a + I_b + I_c|}{mediana(I_a, I_b, I_c)} \quad (4.1)$$

onde I_a , I_b e I_c são os valores de corrente para as três fases. Caso o valor de *Indice* seja superior a 0.05 o terra é considerado na falta.

Outra aplicação apresentada é um modelo de regressão, também com base em ELM e SVM, para a localização da faltas. Nela são treinados quatro modelos ELM / SVM específicos para tipos diferentes de falta: fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra e trifásica. São inseridos os valores da componente de alta frequência da transformada *Wavelet* e utilizado como valor alvo a distância da falta a um dos terminais.

Na avaliação dos resultados, o método baseado em SVM apresentou os melhores resultados para detecção, classificação e localização de faltas. São apresentados cenários simulados de faltas em diversas configurações de ângulo, impedância e parâmetros de circuito e linha. Não são discutidos casos reais de falta na análise. Outro ponto interessante do trabalho é um comparativo entre a realização do diagnóstico de faltas com e sem a transformada *Wavelet*. Os resultados obtidos a partir de sinais processados pela transformada foram mais positivos.

4.2.2 Energy and entropy-based feature extraction for locating fault on transmission lines by using neural network and wavelet packet decomposition - 2008 - S. Ekici, S. Yildirim, M. Poyraz - Ekici et al. [2008]

O artigo propõe um método para localização de faltas a partir também de um processamento dos sinais de oscilografia com uma transformada *Wavelet*. Os sinais decompostos são utilizados no processamento de uma entrada para o treinamento de uma **Rede Neural Artificial - RNA**, Bishop [1995], que considera as distâncias de cada falta da base de treinamento como a saída esperada pelo modelo.

Um diferencial da proposta está nas características extraídas do sinal decomposto para serem utilizadas nas camadas de entrada da RNA: energia e entropia. O cálculo desses valores, descrito em maiores detalhes na subseção 4.3.4, proporciona uma redução na dimensionalidade do vetor de características. Se comparado com outros trabalhos em que coeficientes de todas os níveis de transformação são inseridos no vetor, tem-se com esse cálculo um valor reduzido, porém representativo. No trabalho são avaliadas combinações de valores de energia e entropia extraídos de sinais de tensão e corrente para se definir qual valor é mais relevante para o modelo de localização. Nos resultados observados, o melhor desempenho ocorreu na utilização de energia de sinais de corrente.

4.2.3 Automatic classification of power quality events and disturbances using wavelet transform and support vector machines - 2012 - H. Eristi, Y. Demir - Eristi & Demir [2012]

Esse trabalho propõe a utilização de técnicas de Inteligência Computacional para uma classificação de eventos ocorridos em linhas de transmissão. Os eventos considerados são faltas (simétricas ou assimétricas), faltas auto-extinguíveis, energização da linha, energização do transformador e interrupção do fornecimento.

Para a análise do problema, os sinais de tensão das três fases do circuito são processados a partir da transformada *Wavelet*. O valor de cada característica é obtido através de um cálculo de energia aplicado às componentes de detalhe e aproximação extraídas da decomposição resultante da transformada. São considerados nove níveis de decomposição do sinal de tensão através da transformada *Wavelet*, sendo calculados os valores de energia das componentes de aproximação de cada um deles e também da componente de detalhe do último nível, totalizando assim 30 características. Esses valores são aplicados a um classificador SVM com o *kernel* RBF. Para a definição dos melhores parâmetros do *kernel* foi utilizada uma busca baseada no método *grid search* combinada com a validação cruzada *k-fold*, Kohavi [1995].

O modelo foi aplicado a uma base de dados reais tendo obtido bons resultados. Na comparação com outros modelos, além da melhor precisão do trabalho proposto, se destaca o melhor desempenho computacional do classificador SVM, em comparação com técnicas baseadas em RNAs.

4.2.4 Detecção e Classificação de Faltas em Linhas de Transmissão utilizando Análise Funcional e Inteligência Computacional - 2011 - A. S. Gomes - Gomes [2011]

O trabalho apresenta modelos para a detecção e classificação de faltas elaborados a partir de uma análise funcional dos valores de tensão e corrente aplicada a técnicas de Inteligência Computacional para a obtenção dos resultados.

A análise se baseia na projeção dos valores de tensão e corrente em um espaço bidimensional obtido a partir da relação entre as potências aparente, ativa e reativa do sistema. Tal representação bidimensional pode ser descrita geometricamente em termos dos parâmetros que caracterizam uma seção cônica do tipo elipse. Em um sistema trifásico operando em condições normais, essa representação mantém parâmetros que

descrevem um comportamento elíptico semelhante para todas as fases. Sendo assim, o modelo observa exatamente as variações desses parâmetros para todas as etapas de análise de faltas.

Para a detecção de faltas, as variações de parâmetros da elipse são interpretadas em cada fasor do sistema. Detectada a falta os valores foram aplicados a modelos de classificação para a identificação do tipo de falta quanto a sua natureza elétrica (faltas do tipo fase-terra, fase-fase, dentre outras).

As mesmas informações foram utilizadas para uma classificação da falta quanto ao evento causador, a exemplo do foco principal do processo de classificação proposto nesta dissertação. Nele, foram avaliadas ocorrências reais de faltas causadas pelos seguintes eventos: queimada, entrelaçamento de cabos, descarga elétrica e queda de árvore.

Os modelos com melhores resultados no trabalho foram os de Rede Bayesiana, uma combinação entre Naive Bayes e Tabelas de Decisão e também uma implementação do método *K-Nearest Neighbour* (KNN). Os modelos foram avaliados a partir de casos de falta simulados e também de dados reais fornecidos por uma empresa de transmissão de energia elétrica.

4.2.5 Location of faults generating short-duration voltage variations in distribution systems regions from records captured at one point and decomposed into damped sinusoids - 2012 - L. Lovisolo, J.A. Moor Neto, K. Figueiredo, L. de Menezes Laporte, J.C. dos Santos Rocha - Lovisolo et al. [2012]

O trabalho apresentado por Lovisolo et al. [2012] propõe um modelo para localização e classificação de faltas quanto à natureza elétrica. Para tanto, se baseia em informações extraídas dos parâmetros descritores das ondas senoidais dos sinais de tensão e corrente do circuito.

Inicialmente, os valores de amplitude, ângulo e frequência da componente fundamental de cada fase são estimados e monitorados para a detecção de faltas. Caso ocorra alguma variação nos parâmetros acima do limiar estabelecido, a fase é apontada como em falta. Em seguida, são extraídos os valores de amplitude, frequência, ângulo, decaimento e instantes de início e fim para serem aplicados aos problemas de classificação e localização de falta. O modelo utilizado para a classificação é baseado

na técnica de SVM enquanto que a localização da falta é estimada a partir de uma modelo de Redes Neurais.

Dado que os parâmetros citados são calculados para a componente fundamental e também segundo e terceiro harmônicos, são obtidos 18 valores para cada fase processada. Desse modo, são extraídos no total 108 parâmetros para serem utilizados como características nos modelos de classificação. Portanto, o trabalho realiza uma etapa anterior ao processo de classificação que consiste na seleção das características mais relevantes. O método de seleção de características aplicado é o *Relief-F*, que é uma variação do método *Relief*, descrito em maiores detalhes na seção 4.4, com os de um processo que avalia o desempenho de alguns subconjuntos de características ao serem aplicados no modelo de Redes Neurais. Desse modo, o algoritmo possui uma redução de dimensionalidade e maior capacidade de geração de um modelo consistente.

4.3 Extração de Características

Como mencionado na seção anterior, algumas características amplamente aplicadas a problema de localização e classificação são analisadas neste trabalho. As seguintes subseções descrevem essas características.

4.3.1 Duração da Falta

Faltas podem ser diferenciadas umas das outras com base em suas durações. Eventos causadores podem influenciar na diferença entre os períodos de duração. É considerado duração de uma falta o período compreendido entre a ocorrência da mesma e a abertura do disjuntor.

A técnica utilizada no trabalho se baseia no princípio de que o circuito da linha de transmissão, durante o estado permanente, mantém sua energia concentrada na componente de frequência fundamental. Portanto, é considerado início da falta o momento em que são observadas variações no sinal que resultam em um espalhamento de energia para as demais componentes. No mecanismo adotado, um fasor cuja energia total esteja concentrada abaixo de um limiar de 97% na componente fundamental é considerado em um estado transitório de falta. O momento em que não é detectada nenhuma corrente nos fasores da linha de transmissão avaliada aponta a abertura do disjuntor e, conseqüentemente, o fim de período de falta.

4.3.2 Energia Harmônica

Como discutido em seções anteriores, uma falta pode ser identificada através de um distúrbio no sinal de oscilografia emitido dos componentes. A característica de energia harmônica consiste em uma avaliação de tal distúrbio, de modo a mensurar a distância entre a componente fundamental e seu terceiro harmônico em termos da amplitude de seus sinais. Para este cálculo, a equação (4.2) é aplicada:

$$dist = \frac{|s| - |s_3|}{|s|} \quad (4.2)$$

onde s é a amplitude do sinal na frequência fundamental e s_3 sua amplitude no terceiro harmônico. Ambos são extraídos de uma representação fasorial obtida a partir do processo de estimação apresentado na seção 2.5.1.1. Vale destacar também que todos os valores são utilizados na equação 4.2 são absolutos.

4.3.3 Impedância da Falta

A extração desta característica se baseia no método MLEMQ, descrito em detalhes na seção 3.3. O método é usado tanto para a estimação de impedância quanto para o problema de localização de falta. Para a questão aqui avaliada de classificação de eventos, apenas a primeira é considerada. Da impedância obtida, três características são extraídas: as componentes **real** e **imaginária** de impedância e seu valor **absoluto**.

4.3.4 Energia do Sinal a partir de Transformada *Wavelet*

Conforme discutido na seção 2.5.3.1, a decomposição em vários níveis pode ajudar a elucidar padrões pouco visíveis. Há, no entanto, a necessidade de se definir um critério de parada para os níveis de decomposição durante a aplicação de uma transformada *Wavelet*. A exemplo de alguns trabalhos, como Ekici et al. [2008], foi utilizado o cálculo de **Mínima Entropia** a cada nível para se decidir até que ponto a decomposição poderia trazer resultados relevantes. O mecanismo adotado é descrito no algoritmo 1.

O método de Shannon, descrito em Shannon [1948], foi utilizado para o cálculo de entropia H , a partir da seguinte equação:

$$H(s) = \sum_i c_i \log(c_i^2) \quad (4.3)$$

onde c_i é a componente de aproximação do sinal s no nível i .

Para o cálculo de Energia, a equação 4.4 foi utilizada com base em Morchen [2003].

Algoritmo 1 *Algoritmo Mínima Entropia*

```

1: [aproximacao detalhe] ← dwt(sinal)
2: energia ← calcula_energia(aproximacao)
3: entropia ← calcula_entropia(aproximacao)
4: repeat
5:   [aproximacao detalhe] ← dwt(aproximacao)
6:   nova_entropia ← calcula_entropia(aproximacao)
7:   if nova_entropia < entropia and nova_entropia ≠ 0 then
8:     energia ← calcula_energia(aproximacao)
9:     entropia ← nova_entropia
10:  else
11:    break
12:  end if
13: until nivel_maximo_decomposicao

```

$$E = \sum_{j \in \mathbb{J}} \frac{c_j^2}{|\mathbb{J}|} \quad (4.4)$$

Sendo \mathbb{J} o conjunto de níveis de interesse para o cálculo de energia e $|\mathbb{J}|$ a cardinalidade do conjunto.

Ao fim do processamento do algoritmo, o valor calculado de Energia para o nível com a menor entropia é utilizado como característica para a falta.

4.4 Seleção de Características

O método Relief, proposto por K. Kira [1992], é utilizado para seleção de características. Dado um conjunto de dados \mathbb{S} com m instâncias, onde cada uma é rotulada como positiva ou negativa e representa um conjunto de k características em um vetor de mesma dimensão com valores reais. A técnica consiste em extrair aleatoriamente instâncias de \mathbb{S} e compará-las uma a uma com subconjuntos de instâncias positivas e negativas (classes -1 e 1). Para cada instância X avaliada, são determinadas as instâncias T^+ e T^- , pertencentes aos subconjuntos positivo e negativo, respectivamente, que se encontram mais próximas de X . Tal determinação é feita a partir da distância Euclideana entre os vetores de características de cada instância. Encontradas as instâncias, a proximidade de cada característica de X às presentes em T^+ e T^- é utilizada para a avaliação de relevância da característica, quantificada através de um valor, denominado peso. O processo é repetido para diferentes instâncias X , sendo o resultado utilizado para a atualização de um vetor de pesos W com k dimensões, onde cada posição representa uma característica.

Ao fim do processo, um limiar é aplicado a W , apontando as características mais relevantes. De acordo com K. Kira [1992], características com valores positivos tendem a ser consideradas relevantes, enquanto que valores negativos ou próximos de zero sugerem características irrelevantes. O algoritmo do método é descrito em detalhes em 2, onde nu_k é uma unidade de normalização utilizada para levar os valores da função $diff$ para o intervalo $[0,1]$.

Algoritmo 2 *Relief - K. Kira [1992]*

```

1: procedure RELIEF( $\mathbb{S}, m$ )
2:    $\mathbb{S}^+ \leftarrow \mathbb{S}$  instância positiva
3:    $\mathbb{S}^- \leftarrow \mathbb{S}$  instância negativa
4:    $W \leftarrow \{0, 0, 0, \dots, 0\}$ 
5:   for  $i \leftarrow 1$  to  $m$  do
6:     Obter  $X \in \mathbb{S}$ 
7:     Obter positiva mais próxima de  $X, T^+ \in \mathbb{S}^+$ 
8:     Obter negativa mais próxima de  $X, T^- \in \mathbb{S}^-$ 
9:     if  $X$  é positiva then
10:      Acerto-proximo  $\leftarrow T^+$ 
11:      Erro-proximo  $\leftarrow T^-$ 
12:     else
13:      Acerto-proximo  $\leftarrow T^-$ 
14:      Erro-proximo  $\leftarrow T^+$ 
15:     end if
16:     for  $j \leftarrow 1$  to  $k$  do
17:        $W(j) \leftarrow W(j) - diff(X(j), Acerto-proximo(j))^2 +$ 
          $diff(X(j), Erro-proximo(j))^2$ 
18:     end for
19:   end for
20: end procedure
21:
22: function DIFF( $X_1, X_2$ )
23:   return  $(X_1 - X_2)/nu_k$ 
24: end function

```

Avaliações realizadas no método indicaram bom desempenho quando aplicado a dados ruidosos, como observado em Queiroz et al. [2013]. Tal aspecto reforça a motivação para sua aplicação neste trabalho, já que nele é utilizada tanto para treinamento quanto classificação uma base de dados com registros reais de faltas. Além disso, trata-se de um algoritmo baseado no conceito de margem, o que o torna mais compatível com o modelo aplicado para classificação, também fundamentado nesse conceito e descrito em maiores detalhes na próxima seção.

4.5 Máquina de Vetores de Suporte

Máquina de Vetores de Suporte - SVM é uma técnica baseada no conceito de margem, que é a menor distância entre subconjuntos de amostras e o limiar de decisão, Bishop [2006]. Em classificadores baseados na margem o melhor modelo fornece uma limiar de decisão cuja margem de separação é maximizada. O classificador SVM usa como limiar de decisão um conjunto de vetores que representam um hiperplano que dividem o espaço amostral.

Dado um conjunto de treinamento \mathbb{S} de m amostras $\{x_i, y_i\}_{i=1}^m$, onde x_i representa o i -ésimo vetor de entrada, classificado de acordo com o rótulo dado por y_i , onde $y_i \in \{-1, 1\}$. O hiperplano que representa o limiar de decisão para o conjunto de treinamento é descrito pela equação $w^T x_i + b = 0$, onde w é um vetor de pesos e b é um parâmetro de viés. Diante dessa representação, a solução para o problema passa a ser uma combinação de valores de w e b que proporcione o maior valor de margem. No entanto, em alguns conjuntos de treinamento tal solução pode não ser obtida diretamente através de um modelo linear. Uma alternativa para tal situação é a aplicação de funções de transformação às amostras, com o objetivo de produzir uma nova representação que possa ser linearmente separável. Essas funções são chamadas *kernel*. Funções *kernel* representam o produto entre duas amostras x_i e x_j pertencentes a \mathbb{S} e transformadas por um função ϕ , conforme a equação 4.5:

$$K(x_i, x_j) = \phi(x_i) \cdot \phi(x_j) = \phi(x_i)^T \phi(x_j) \quad (4.5)$$

São listadas a seguir algumas funções de *kernel* comumente utilizadas:

1. Linear: $K(x_i, x_j) = x_i^T x_j$
2. Polinomial: $K(x_i, x_j) = (x_i^T x_j + c)^d$
3. Função de Base Radial: $K(x_i, x_j) = \exp(-\gamma \|x_i - x_j\|^2)$, $\gamma > 0$
4. Sigmoide: $K(x_i, x_j) = \tanh(\gamma x_i^T x_j + c)$, $\gamma > 0$, $c > 0$

Onde γ , c e d são parâmetros do *kernel*.

Além das funções de *kernel*, outros ajustes podem melhorar o modelo. Por exemplo, a inclusão de variáveis de folga ϵ_i , utilizadas para permitir erros no treinamento, se comportando como fatores de penalidade. O peso das variáveis é determinado por um coeficiente C , chamado *fator de regularização*. Assim, a equação pode ser reescrita como em 4.6.

$$\nu(w, \epsilon) = \frac{1}{2}w^T w + C \sum_{i=1}^N \epsilon_i \quad (4.6)$$

$$\text{sujeito a } y_i \{w^T \phi(x_j) + b\} > 1 - \epsilon_i; \epsilon_i > 0 \quad (4.7)$$

Menores valores para o fator de regularização C tendem a maximizar a margem de separação, enquanto que valores maiores tendem a reduzir a margem e consequentemente permitir um número maior de instâncias classificadas com erro. Neste trabalho a busca por melhores opções de C e função de *kernel* foi conduzida de maneira empírica.

Algoritmos que possuem uma formulação baseada nas funções de *kernel* têm como importante característica a capacidade de representar geometricamente um espaço de características originalmente não-linear, conforme discutido em Chen et al. [2005]. Além disso, a escolha do *kernel* mais adequado pode fornecer informações importantes sobre a natureza dos dados que estão sendo trabalhados. Considerando que ainda há muito o que se explorar no campo de relacionamento entre faltas e eventos causadores, uma técnica baseada nesses mecanismos como a SVM se apresenta como uma escolha interessante para a elaboração do modelo classificatório. Outro aspecto importante relacionado com a SVM é sua boa resposta a problemas em que há uma baixa disponibilidade de instâncias de treinamento. Como avaliado em Vieira et al. [2008], há no método SVM um direcionamento maior para a elaboração de um modelo que, através de hiperplanos dentro do espaço gerado pelas características, possa definir uma fronteira. Portanto, as informações mais importantes para o algoritmo estão contidas nas instâncias limítrofes, de modo que, em alguns casos, a inclusão de mais dados de treinamento pode oferecer pouca contribuição para a consolidação do modelo.

Capítulo 5

Resultados

5.1 Testes de Localização de Faltas

Para avaliar o MLEMQ, foram utilizadas faltas geradas com uma ferramenta de simulação de circuitos e também casos reais de faltas registrados pela CTEEP. As subseções seguintes apresentam o ambiente configurado para as simulações e os resultados obtidos para a avaliação do problema de Localização de Faltas.

5.1.1 Ambiente de Testes - ATP-EMTP

Para avaliar as técnicas, foi configurada uma linha de transmissão virtual de 100 km e frequência de 60 Hz com a ferramenta ATP-EMTP, apresentado em Kizilcay [2010]. Os parâmetros utilizados no circuito configurado são apresentados nas tabelas 5.1 e 5.2.

Além da linha configurada, foi mantida uma chave ligando uma fase A a uma resistência, configurada para ser fechada após 23 ms de execução, simulando assim

Parâmetros	Terminais	
	S	R
Tensão LL,RMS (kV)	416	400
Deslocamento de Fase (°)	0	-20
Resistência (Ω)	1,0185892	0,6366183
Indutância(H)	0,0509295	0,0318309
Resistência Zero (Ω)	2,0371785	1,2732366
Indutância Zero (H)	0,1018589	0,0636618

Tabela 5.1 Parâmetros dos terminais

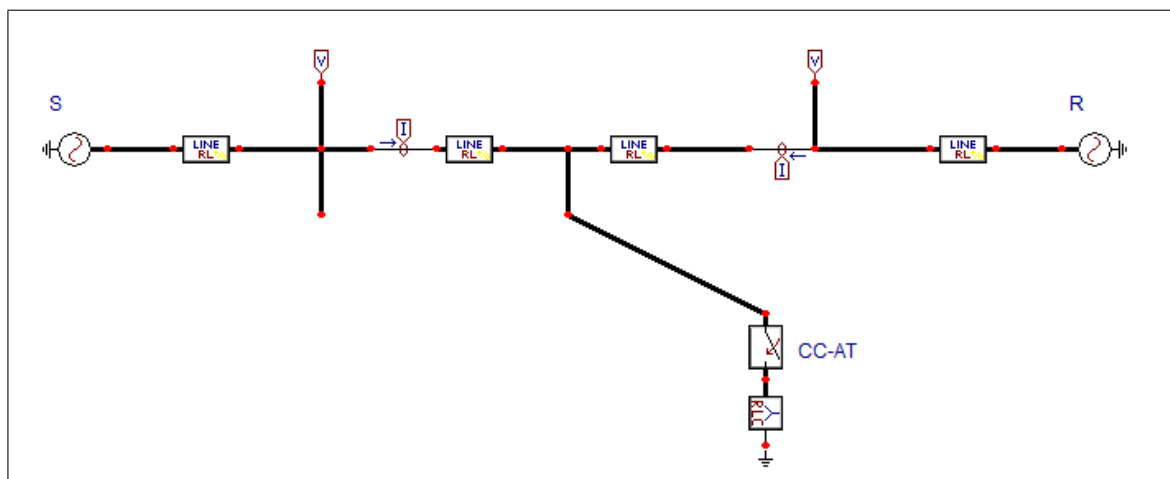


Figura 5.1 Exemplo de Linha de Transmissão no ATP-EMTP.

Parâmetros	Seq Pos/Neg	Seq Zero
Resistência (Ω/km)	0,065	0,195
Indutância(mH/km)	0,95493	2,86479

Tabela 5.2 Parâmetros da linha

uma falta a cada execução da ferramenta.

Configurado o ambiente, faltas foram simuladas ao longo da linha para se avaliar o desempenho das técnicas. Foi avaliada a sensibilidade das técnicas à distância da falta e também à sua impedância. Além disso, também foi observado o desempenho das técnicas diante de ruídos no sinal de oscilografia e impedância característica da linha. Os resultados dos testes são descritos nas próximas seções.

5.1.2 Distância x Impedância da Falta

A primeira questão analisada nos testes foi a sensibilidade das técnicas à distância de ocorrência da falta e a impedância associada à mesma. Para esta avaliação, foram simuladas faltas ao longo da linha de 100 km. Foram escolhidos 9 pontos dentro do intervalo de 10 a 90 km, com iguais espaçamentos de 10 km entre eles. Para cada um dos pontos, foram simuladas faltas com impedâncias de 0 a 100 Ω . Na Figura 5.2 são ilustrados resultados para simulações da técnica apresentada em todas as combinações definidas para distância e impedância de falta.

Os valores de tensão e corrente medidos nos terminais são fundamentais para os cálculos realizados pelas técnicas avaliadas. No entanto, em situações reais, a ocorrência

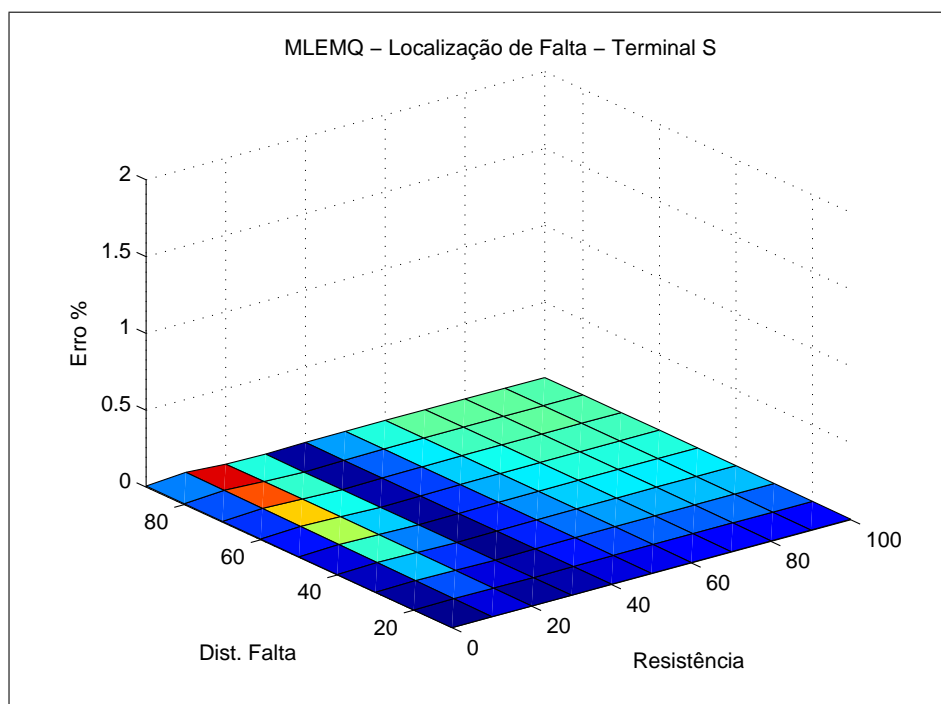


Figura 5.2 MLEMQ - Distância x Falta

de algum ruído na medição de tais valores pode ocorrer. Sendo assim, é importante observar o comportamento dos algoritmos diante de situações em que um ruído no sinal possa ocorrer. Para a avaliação de sensibilidade ao ruído de oscilografia, foi inserido um valor de reajuste aleatório gerado a partir da fórmula $M = M + M_{max} * 0,05 * \zeta$, onde M_{max} é o valor máximo medido no canal de oscilografia, para tensão ou corrente e ζ é um valor aleatório entre 0 e 1. Os testes feitos para esse cenário são exibidos na Figura 5.3.

Nos testes realizados em ambiente simulado sem ruído, o percentual de erro na localização apresentado ficou em média abaixo de 1%. Nos cenários em que uma componente de ruído foi incorporada ao sinal, algumas situações apresentaram erros a um patamar abaixo de 2%. Pôde ser observado que, as situações de maior percentual de erro estão associadas a faltas de maior impedância ou mais distantes do terminal de referência S.

5.1.3 Comparativo entre técnicas de Localização

Um comparativo entre o MLEMQ e as técnicas de Radojevic et al. [2009] e Tizouvaras et al. [2001] é apresentado na Figura 5.4. Nos testes realizados, foram simuladas faltas a uma distância de 50 km do terminal de S, com impedâncias variando de 0 a 100 Ω com espaçamentos de 10 Ω entre cada falta. Para avaliar a reação dos

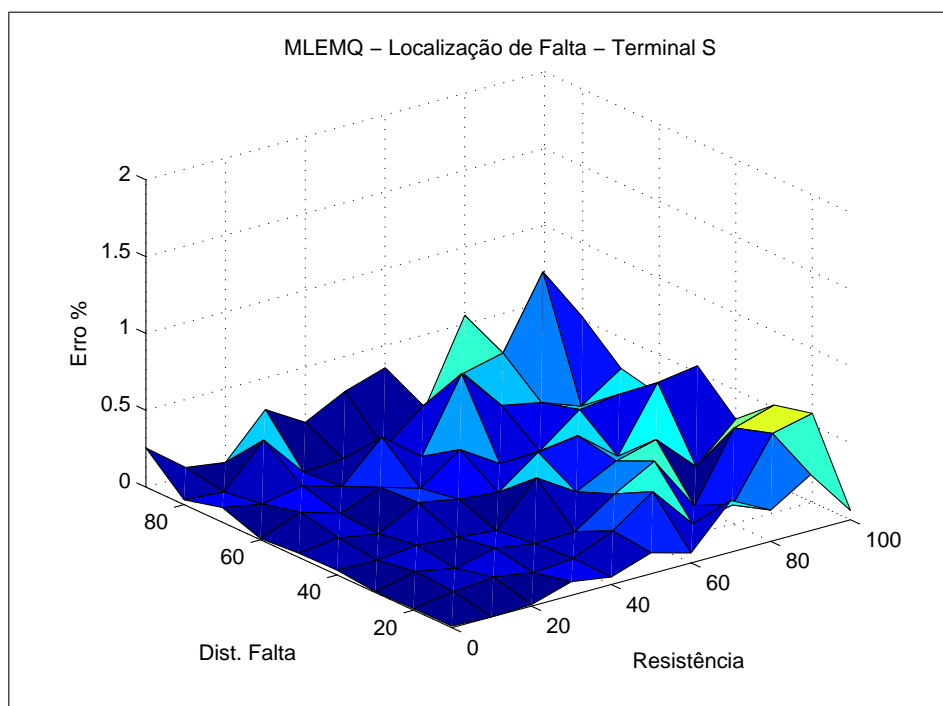


Figura 5.3 MLEMQ - Distância x Falta - Ruído no Sinal

métodos a ruídos na oscilografia, foi inserido um ruído Gaussiano com uma taxa sinal-ruído (do inglês *signal-to-noise ratio* - *SNR*) de 20dB. Os métodos avaliados utilizaram a mesma técnica de estimação fasorial baseada em Mínimos Quadrados apresentada na seção 2.5.1.1.

Nos testes realizados em ambiente simulado sem ruído, o percentual de erro na localização apresentado ficou em média abaixo de 1%. Nos cenários em que uma componente de ruído foi incorporada ao sinal, algumas situações apresentaram erros a um patamar abaixo de 2%. Pôde ser observado que, as situações de maior percentual de erro estão associadas a faltas de maior impedância ou mais distantes do terminal de referência S .

Na comparação com outros métodos, o MLEMQ apresentou maior estabilidade mesmo em faltas de maior impedância. Tais situações indicam uma boa robustez do método proposto quando utilizado em situações com presença de ruído no sinal.

5.1.4 Incerteza na Impedância da Linha

A nova técnica considera as impedâncias da linha em seu cálculo. Estas, porém, estão sujeitas a problemas de precisão das estimativas de seus valores, o que pode acarretar em uma localização incorreta da falta. Desse modo, é avaliada nesta seção a sensibilidade do algoritmo a estimativas incorretas das impedâncias da linha. Para tanto, o

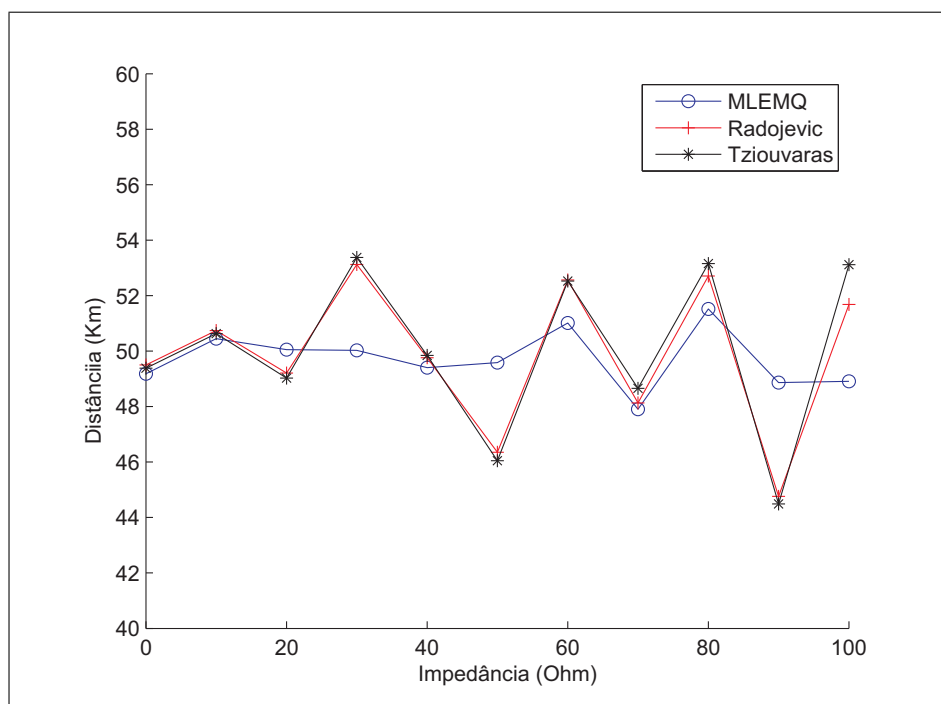


Figura 5.4 Comparativo entre Métodos de Localização de Falta

		Z_0		
		-5%	0%	+5%
Z_1	-5%	2.6347	1.5236	0.5554
	0%	1.0512	0.0074	1.0009
	+5%	0.5278	1.4283	2.3781

Tabela 5.3 MLEMQ - Erro médio de localização para variações nas impedâncias Z_0 e Z_1 da linha.

cálculo foi realizado após a inserção de erros de $\pm 5\%$ nos valores das sequências zero e positiva das impedâncias da linha. Com base nos resultados calculados, foi observado o erro médio da localização para cada caso, de modo a identificar qual dos fatores (ou qual combinação entre eles) poderia causar maior prejuízo para o algoritmo. Os resultados podem ser vistos na tabela 5.3.

Nos resultados obtidos, pode ser observado que, em média, o método possui boa robustez a variações nos valores estimados para as impedâncias da linha, dado que o percentual de erro aplicado nos testes (5%) é um fator considerável de variação. Mesmo em situações de maior distanciamento entre os valores, os resultados se mantiveram em um baixo percentual de erro médio.

5.1.5 Testes em Casos Reais

O desempenho do método foi avaliado em alguns casos reais faltas, ocorridos por diferentes causas. Os casos foram cedidos pela CTEEP. Os resultados são comparados com os valores posteriormente anotados pela equipe de manutenção da empresa, sendo calculada a diferença, em termos percentuais, entre estes e os retornados pelo método. Os resultados são apresentados na tabela 5.4.

Tabela 5.4 Testes em Casos Reais

Tamanho da Linha	Causa	Resultado Inspeção	Resultado MLEMQ	Erro (%)
375,94 km	Queimada	195,50 km	210,09 km	3,88
235 km	Queda da Torre	37,00 km	43,39 km	2,72
137,66 km	Descarga Elétrica	18,00 km	16,44 km	1,13

Os testes em casos reais apresentaram um baixo percentual de erro. Vale observar que os maiores valores observados foram para linhas de maior comprimento, ou seja, acima de 200 km. Nesse caso, considerando que o método foi elaborado a partir do modelo nominal série, mais indicado para linhas curtas, a aplicação de modelos mais indicados para linhas maiores poderia apresentar uma representação mais próxima das linhas em questão e, conseqüentemente, reduzir os erros observados.

5.1.6 Estimativa de Impedância da Falta

Além de determinar a distância, a formulação proposta na nova técnica também retorna um valor referente à impedância da falta ocorrida quando atingido um conjunto de parâmetros que se igualem a zero. Por conta disso, foi avaliado no trabalho o comportamento da estimativa da impedância de faltas, sendo inseridos alguns dos fatores mencionados nas seções anteriores como o ruído nos sinais. Os gráficos 5.5 e 5.6 exibem os resultados obtidos.

As estimativas de impedância foram realizadas juntamente com os testes de distância x impedância apresentados nas seções anteriores. O percentual de erro médio na estimativa de impedância foi um pouco menor que o observado para o método na localização de faltas, mesmo nas situações de ruído. Tal característica reforça o potencial do método como ferramenta de estimativa de impedância de faltas.

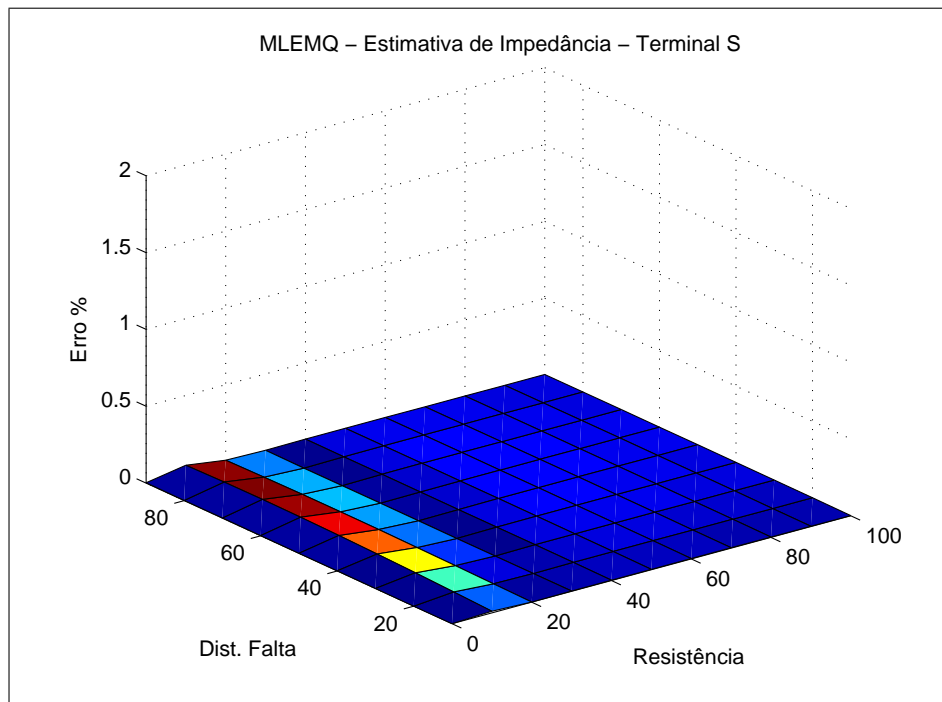


Figura 5.5 MLEMQ - Distância x Falta

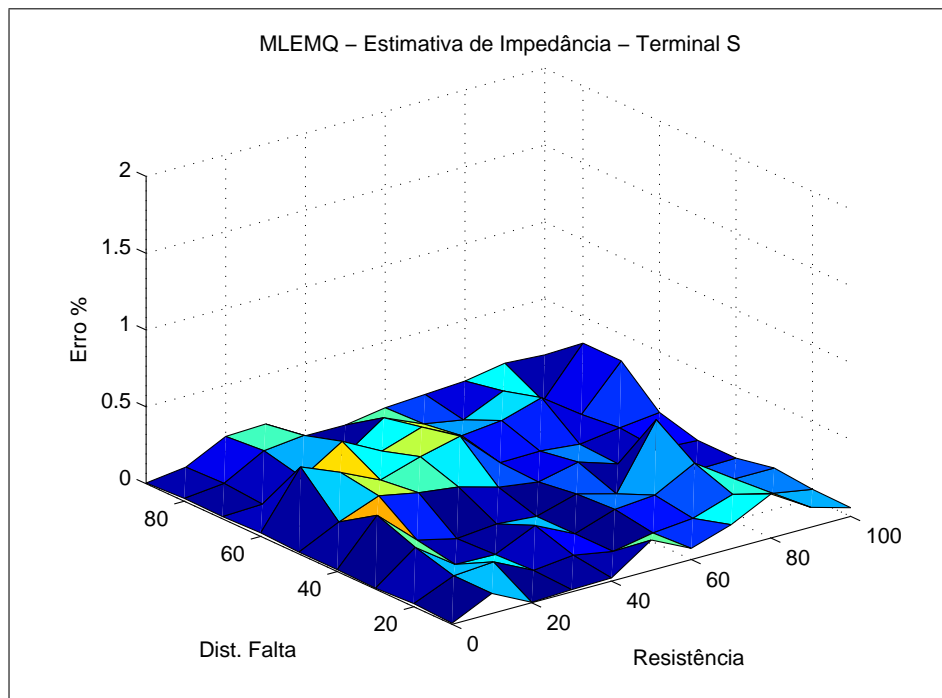


Figura 5.6 MLEMQ - Distância x Falta - Ruído no Sinal

5.2 Testes de Classificação de Faltas

Os testes foram realizados em uma base de dados formada por ocorrências reais de faltas coletadas por uma companhia fornecedoras de energia elétrica. A base possui as instâncias listadas na Tabela 5.5.

Causa	Número de ocorrências
Queimada	10
Descarga elétrica	6

Tabela 5.5 Base de dados de treinamento

5.2.1 Resultado de Seleção de Características

As características extraídas foram primeiramente avaliadas no método Relief, para que pudesse ser encontrado o subconjunto mais representativo. Os resultados são descritos na Tabela 5.6.

Característica	Valor Relief
Impedância(abs)	0,4380
Impedância(real)	0,4156
Impedância(imag)	0,4112
Energia Wavelet	0,4016
Duração	-0,1046
Energia Harmônica	-0,1566

Tabela 5.6 Resultado de Seleção de Características

A utilização das características melhor avaliadas no Relief aponta resultados que contribuem para a decisão sobre o modelo de classificação. Isso pode ser evidenciado no gráfico da Figura 5.7, gerado com as duas características de melhor classificação. É possível observar que o espaço amostral apresenta melhores soluções de uma separação linear entre as classes de falta avaliadas (queimada e descarga elétrica), como a proposta pela linha em vermelho. Por outro lado, o gráfico da Figura 5.8, feito com as características de pior avaliação, indica pontos cuja separação sugeriria um modelo mais complexo.

5.2.2 Resultado de Classificação de Faltas

Com base no resultado da seleção de características, as mesmas são aplicadas ao modelo SVM. Nos testes, inicialmente todas as características foram consideradas na elabora-

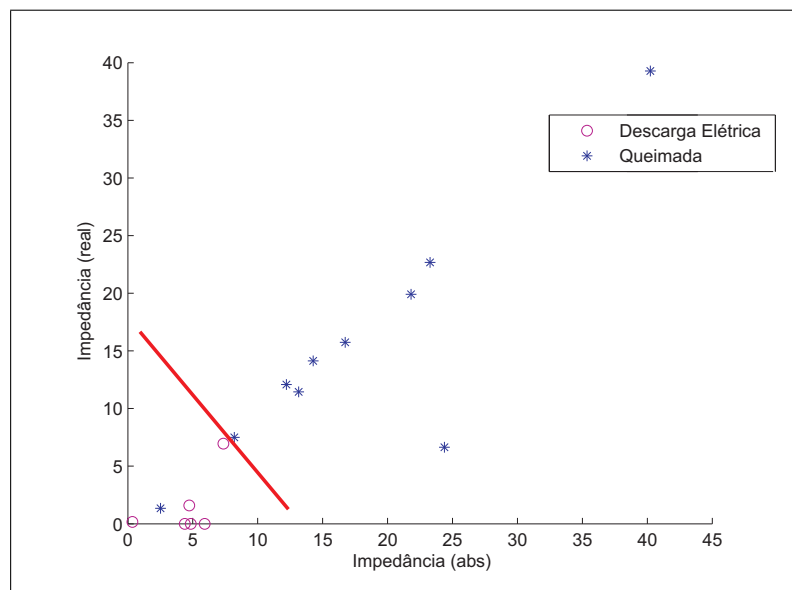


Figura 5.7 Impedância Real x Impedância Absoluta.

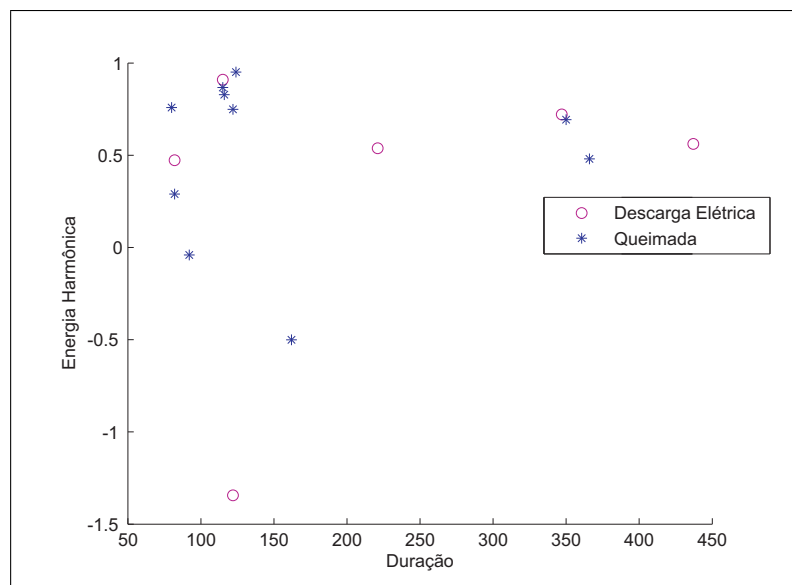


Figura 5.8 Duração x Energia Harmônica.

ção do modelo. Em seguida, uma nova tentativa foi realizada considerando para o treinamento do modelo somente as características que tiveram um resultado positivo no Relief. Por fim, foi utilizada somente a característica que obteve o melhor resultado no processo de seleção. Os resultados da classificação são demonstrados na Tabela 5.7.

Todos os modelos de classificação foram avaliados de acordo com a técnica *Leave-One-Out*, Bishop [2006], onde uma instância é removida para ser utilizada no teste, enquanto que as demais são utilizadas no treinamento do modelo. Esse procedimento

Cenário de Teste	Percentual de Acerto
Todas as Características	75,00
Características com resultado positivo	87,50
Característica Melhor Avaliada	87,50

Tabela 5.7 Resultado da Classificação

foi realizado para todas as instâncias da base de treinamento e o valor anotado para desempenho foi calculado a partir do percentual de acertos obtidos na avaliação completa da base.

As opções de função *kernel* mencionadas na Seção 4.5 foram avaliadas e o modelo de melhor desempenho foi o baseado no *kernel* linear. Nesse caso, as alternativas de ajuste no fator de regularização não surtiram efeitos significativos no modelo.

O modelo de classificação gerado ao fim do processo possui bom percentual de acerto dentro das amostras avaliadas. Além disso, possui uma representação simples, baseada em um kernel linear, o que simplifica a análise dos dados processados.

Capítulo 6

Conclusão e Trabalhos Futuros

Através dos valores obtidos, pode-se destacar a robustez do MLEMQ para dados ruidosos em comparação com outros métodos avaliados. Ao trabalhar com uma janela de medições e aplicar Mínimos Quadrados na obtenção do resultado, o método age exatamente em cima dos erros de medição causados por ruídos no sinal. Tal característica é importante para a aplicação de um método a ocorrências reais de faltas.

Além disso, os resultados para a estimativa de impedância apresentaram boa precisão mesmo em situações de faltas com altos valores desse parâmetro, o que reforça a utilização do método para a extração de valores a serem utilizados como informação para outros métodos, como o de classificação de faltas apresentado neste trabalho.

Na comparação entre os resultados obtidos nos processos de seleção de características e classificação, a importância da realização dessa etapa preliminar é destacada. Características com baixos resultados no processo realizado pelo método *Relief* ofereceram de fato pouca informação relevante para o modelo, além de forçar o desenvolvimento de um modelo de classificação mais complexo. Dentre as características avaliadas, o valor absoluto de impedância foi considerado o mais representativo para a identificação de faltas causadas por descargas elétricas e queimadas.

6.1 Trabalhos Futuros

6.1.1 MLEMQ para Linhas Longas

A formulação do MLEMQ apresentada no trabalho é destinada especificamente para modelos Nominal-Série, que é mais indicado para linhas curtas. Linhas maiores são melhor descritas em um modelo cuja formulação é mais complexa em virtude da inclusão de parâmetros de linha distribuídos. Portanto, a função objetivo apresentada em

(3.19) seria reescrita da seguinte maneira:

$$\min_{\ell_s, R_f} F(\ell_s, R_f) = |V_{ps} + V_{ns} + V_{zs} - 3R_f(I_{ps} + I_{pr})|^2 \quad (6.1)$$

Onde:

$$\begin{aligned} V_{zs} &= \cosh(\gamma_z \ell_s) V_{zs} - Z_{cz} \sinh(\gamma_z \ell_s) I_{zs} \\ V_{ps} &= \cosh(\gamma_p \ell_s) V_{ps} - Z_{cp} \sinh(\gamma_p \ell_s) I_{ps} \\ V_{ns} &= \cosh(\gamma_n \ell_s) V_{ns} - Z_{cn} \sinh(\gamma_n \ell_s) I_{ns} \\ I_{ps} &= \sinh(\gamma_p \ell_s) V_{ps} / Z_{cp} \cosh(\gamma_p \ell_s) I_{ps} \\ I_{pr} &= \sinh(\gamma_p \ell_s) V_{pr} / Z_{cp} \cosh(\gamma_p \ell_s) I_{pr} \end{aligned} \quad (6.2)$$

Z_c são as impedâncias características da linha e γ são as constantes de propagação. No entanto, essa formulação não possui a linearidade da equação utilizada na função objetivo original, o que impediria a obtenção de uma solução única para o problema a partir da aplicação direta do método dos Mínimos Quadrados. Uma alternativa para contornar a questão seria incrementar o método com alguma técnica de análise numérica para equações não-lineares, como o método de Newton-Raphson.

6.1.2 Melhorias no Modelo de Classificação

Devido à baixa disponibilidade de bases de dados contendo informação sobre faltas e seus eventos causadores o modelo foi gerado a partir de um número reduzido de ocorrências. É trabalho futuro aplicar o modelo gerado a outras bases de dados com diferentes causas de faltas para observar se a impedância também pode ser aplicada para a identificação de outros eventos.

Outra linha a ser seguida é a avaliação de outras características que possam ser adicionadas ao modelo de classificação. Parâmetros extraídos a partir de representações geométricas dos sinais, como os apresentados nos trabalhos de Gomes [2011] e Lovisolo et al. [2012] podem ser avaliados em trabalhos futuros.

Um aumento da base avaliada pode influenciar na busca por novas representações dos dados, com o objetivo de se obter um novo hiperplano de separação no modelo SVM. Consequentemente, a identificação de melhores parâmetros para funções *kernel* pode ser tornar mais complexa. Para auxiliar nesse problema alguns métodos podem

ser incorporados ao processo para configuração dos parâmetros, como apresentado em Lorbert & Ramadge [2010].

Referências Bibliográficas

- ANEEL (2013). Agência Nacional de Energia Elétrica - <http://www.aneel.gov.br/>.
- Belegundu, A. D. & Chandrupatla, T. R. (2011). *Optimization Concepts and Applications in Engineering*. Cambridge University Press.
- Bishop, C. (1995). *Neural Networks for Pattern Recognition*. Oxford University Press.
- Bishop, C. M. (2006). *Pattern Recognition and Machine Learning (Information Science and Statistics)*. Springer-Verlag.
- Blackburn, J. L. (1993). *Symmetrical Components for Power Systems Engineering*. CRC Press.
- Chen, P.-H.; Lin, C.-J. & Scholkopf, B. (2005). A tutorial on v-support vector machines. *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 21(2):111 – 136.
- Daubechies, I. (1998). Orthonormal bases of compactly supported wavelets. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 41(7):909 –996.
- Ekici, S. (2012). Support vector machines for classification and locating faults on transmission lines. *Applied Soft Computing*, 12:1650–1658.
- Ekici, S.; Yildirim, S. & Poyraz, M. (2008). Energy and entropy-based feature extraction for locating fault on transmission lines by using neural network and wavelet packet decomposition. *Expert Systems with Applications*, 34:2937–2944.
- Eristi, H. & Demir, Y. (2012). Automatic classification of power quality events and disturbances using wavelet transform and support vector machines. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 6:968 –976.
- Fernandez, R. C. & Rojas, H. N. D. (2002). An overview of wavelet transforms application in power systems. *Proceedings 14th. PSCC, Sevilla, Spain*, pp. 24–28.

- Girgis, A.; Hart, D. & Peterson, W. (1992). A new fault location technique for two and three-terminal lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 7:98--107.
- Gomes, A. S. (2011). Detecção e classificação de faltas em linhas de transmissão utilizando análise funcional e inteligência computacional. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Grotschel, M.; Lovasz, L. & Schrijver, A. (1988). *Geometric algorithms and combinatorial optimization*. Springer-Verlag.
- Huang, G.-B.; Zhu, Q.-Y. & Siew, C.-K. (2006). Extreme learning machine: Theory and applications. *Neurocomputing*, 70:489–501.
- Johns, A. T. & Jamali, S. (1990). Accurate fault location technique for power transmission lines. *IEE Proceedings*, 137:395--402.
- K. Kira, L. A. R. (1992). A practical approach for feature selection. *Proceedings of the ninth international workshop on Machine Learning*, pp. 249–256.
- Kizilcay, M. (2010). Alternative transients program. <http://www.emtp.org/>.
- Kohavi, R. (1995). A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. *Proceedings of the Fourteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 12:1137–1143.
- Lorbert, A. & Ramadge, P. J. (2010). Descent methods for tuning parameter refinement. Em *Proceedings of the 13th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics*.
- Lovisol, L.; Neto, J. M.; Figueiredo, K.; de Menezes Laporte, L. & dos Santos Rocha, J. (2012). Location of faults generating short-duration voltage variations in distribution systems regions from records captured at one point and decomposed into damped sinusoids. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 6:1225–1234.
- Malathi, V.; Marimuthub, N. & Baskar, S. (2010). Intelligent approaches using support vector machine and extreme learning machine for transmission line protection. *Neurocomputing*, 73:2160–2167.
- Misiti, M.; Misiti, Y.; Oppenheim, G. & Poggi, J. M. (2004). *Wavelet toolbox for use with Matlab, User's Guide*, 3 edição.

- Morchen, F. (2003). Time series feature extraction for data mining using dwt and dft. Relatório técnico 33, Department of Mathematics and Computer Science, University of Marburg, Germany.
- Oliveira, C. C. B.; Schmidt, H. P.; Kagan, N. & Robba, E. J. (1996). *Introdução a Sistemas Elétricos de Potência - Componentes Simétricas*. Ed. Edgard Blücher.
- ONS (2013). Operador Nacional do Sistema Elétrico - <http://www.ons.org.br/>.
- Queiroz, F. A. A.; Vieira, D. A. G. & Travassos, X. L. (2013). Analyzing the relevant features of gpr scattered waves in time- and frequency-domain. *Research in Nondestructive Evaluation*, pp. 0934–9847.
- Radojevic, Z. M.; Kim, C. H.; Popov, M.; Preston, G. & Terzija, V. (2009). New approach for fault location on transmission lines not requiring line parameters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19:554–559.
- Saha, M. M.; Izykowski, J. & Rosolowski, E. (2010). *Fault Location on Power Networks*. Springer-Verlag.
- Shannon, C. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal*, 27:379–423.
- Silveira, E. G. (2007). *Localização de Faltas em Linhas de Transmissão: Desenvolvimento de novos Algoritmos e Implementação de Sistema Computacional para Aplicações Práticas*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Takagi, K.; Yomakoshi, Y.; Yamaura, M.; Kondow, R. & Matsushima, T. (1982). Development of a new type fault locator using the one terminal voltage and current data. *IEEE Trans. Power App. Syst.*, pp. 2892–2898.
- Tizouvaras, D. A.; Roberts, J. & Benmouyal, G. (2001). New multi-ended fault location design for two- or three-terminal lines. Em *Developments in Power System Protection, 2001, Seventh International Conference on (IEE)*.
- Vieira, D. A. G.; Oliveira, D. B. & Lisboa, A. C. (2013a). A closed form solution for transmission line fault location without the need of terminal synchronization or line parameters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28(2):1238–1239.
- Vieira, D. A. G.; Oliveira, D. B. & Lisboa, A. C. (2013b). A closed form solution for untransposed transmission lines fault location with non-synchronized terminals. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28(1):524–525.

- Vieira, D. A. G.; Takahashi, R. H. C.; Palade, V.; Vasconcelos, J. A. & Caminhas, W. M. (2008). The q-norm complexity measure and the minimum gradient method: A novel approach to the machine learning structural risk minimization problem. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 19:1415–1430.