



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADA EM  
COMPONENTES DE FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL ADAPTADA  
PARA ALIMENTADOR PRIMÁRIO DA CEB DISTRIBUIÇÃO**

**Zulmira Luiza Arruda de Moraes**

**Brasília, dezembro de 2019**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADA EM  
COMPONENTES DE FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL ADAPTADA  
PARA ALIMENTADOR PRIMÁRIO DA CEB DISTRIBUIÇÃO**

**Zulmira Luiza Arruda de Moraes**

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia  
Elétrica como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro Eletricista*

Banca Examinadora

Prof. Felipe Vigolvino Lopes, DSc. (ENE-UnB) \_\_\_\_\_  
*Orientador*

Prof. Francis Arody Moreno Vásquez, DSc. (ENE-  
UnB) \_\_\_\_\_  
*Examinador interno*

Ricardo Vergne Dias, MBA. (CEB-D) \_\_\_\_\_  
*Examinador externo*

## FICHA CATALOGRÁFICA

MORAIS, ZULMIRA LUIZA ARRUDA DE  
METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADA EM COMPONENTES DE FREQUÊN-  
CIA FUNDAMENTAL ADAPTADA PARA ALIMENTADOR PRIMÁRIO DA CEB DISTRIBUI-  
ÇÃO [Distrito Federal] 2019.

xvi, 52 p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheiro, Engenharia Elétrica, 2019).

Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica

- |                          |  |
|--------------------------|--|
| 1. Localização de Faltas | 2. Componentes de Frequência Fundamental |
| 3. Múltiplas Estimativas | 4. Sistemas de Distribuição              |
| I. ENE/FT/UnB            | II. Título (série)                       |

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MORAIS, Z.L.A. (2019). *METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADA EM COMPONENTES DE FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL ADAPTADA PARA ALIMENTADOR PRIMÁRIO DA CEB DISTRIBUIÇÃO*. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 52 p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Zulmira Luiza Arruda de Moraes

TÍTULO: METODOLOGIA DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADA EM COMPONENTES DE FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL ADAPTADA PARA ALIMENTADOR PRIMÁRIO DA CEB DISTRIBUIÇÃO.

GRAU: Engenheiro Eletricista      ANO: 2019

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Conclusão de Curso e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. Os autores reservam outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Conclusão de Curso pode ser reproduzida sem autorização por escrito dos autores.

---

Zulmira Luiza Arruda de Moraes

Depto. de Engenharia Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

## **Dedicatória**

*Dedico este trabalho aos meus pais Marconi e Sandra e à minha avó Zulmira, que sempre estiveram ao meu lado e são os meus maiores exemplos de vida.*

*Zulmira Luiza Arruda de Moraes*

## **Agradecimentos**

*Agradeço à minha família, em especial meus pais, Marconi e Sandra, e à minha avó Zulmira, por serem tão presentes e pelo apoio incondicional e por toda dedicação em me tornar uma pessoa melhor.*

*Ao meu irmão Davi por todo o tempo dedicado em tornar meus dias mais agradáveis com seu bom-humor contagiante.*

*Ao meu amado Felipe Tomé pela paciência, incentivo e apoio nos momentos difíceis.*

*Aos meus gerentes Ricardo Dias e Tadeu Ferreira pela convivência em meu período de estágio na CEB Distribuição, pelas ideias que contribuíram para este trabalho e pelos exemplos de liderança que foram de grande importância em minha jornada de construção pessoal e profissional.*

*À CEB Distribuição pelas informações disponibilizadas que tornaram viáveis as análises realizadas neste trabalho.*

*Zulmira Luiza Arruda de Moraes*

---

## RESUMO

Neste trabalho propõe-se uma metodologia de localização de faltas baseada em componentes de frequência fundamental adaptada para alimentadores primários de redes aéreas de distribuição, com aplicação prática na em circuito de 13,8 kV da CEB Distribuição. Busca-se localizar trechos na extensão do alimentador nos quais existe a possibilidade de existência do defeito. É proposta, também, uma abordagem que minimiza os efeitos das múltiplas estimações com base na avaliação do histórico de ocorrência no alimentador.

Com este objetivo, realiza-se uma revisão dos fundamentos de localização de faltas baseada em componentes de frequência fundamental, apresentam-se alguns métodos relevantes e descreve-se, detalhadamente, a metodologia proposta.

Por fim, apresenta-se o resultado da aplicação de cada um dos passos da metodologia em alimentador da CEB Distribuição modelado, de modo a verificar sua eficácia em casos de defeitos reais na rede.

---

## ABSTRACT

This work proposes an fault location method based on fundamental frequency components adapted for primary feeders of overhead distribution power lines, with practical application in 13.8 kV circuit from CEB Distribuição. The goal is to locate throughout the feeder extension in which there is the possibility of fault existence. Also, an approach is proposed to minimize the effects of multiple estimates based on the assessment of the fault history on the feeder.

With this objective, a review of the fundamentals of fault location methods based on fundamental frequency components is carried out, some relevant methods are presented and the proposed methodology is described in detail.

Finally, the result of the application of each step of the methodology in a modeled feeder from CEB Distribuição is presented, in order to verify its effectiveness in cases of faults in the real network.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	1
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO .....	3
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO .....	3
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTOS DA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADA EM COMPONENTES DE FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL</b> .....	<b>5</b>
2.1	ALGORITMOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE UM TERMINAL .....	5
2.1.1	MÉTODO DA IMPEDÂNCIA .....	8
2.1.2	MÉTODO DA REATÂNCIA SIMPLES .....	9
2.1.3	MÉTODO DE TAKAGI SIMPLES .....	9
2.1.4	MÉTODO DE TAKAGI MODIFICADO .....	10
2.2	O PROBLEMA DAS MÚLTIPLAS ESTIMAÇÕES .....	12
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA PROPOSTA</b> .....	<b>14</b>
3.1	SISTEMA ANALISADO .....	15
3.2	ESCOLHA DO ALGORITMO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS .....	17
3.3	ADAPTAÇÕES NO MÉTODO ESCOLHIDO .....	18
3.4	TRATAMENTO DOS ERROS DE ESTIMAÇÃO .....	19
3.5	MAPEAMENTO DOS TRECHOS ESTIMADOS .....	20
3.6	AUXÍLIO NA TOMADA DE DECISÃO EM CASO DE MÚLTIPLAS ESTIMAÇÕES .....	20
3.6.1	POSIÇÃO DE EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO OU INDICADORES DE FALTA ..	21
3.6.2	CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO ALIMENTADOR .....	22
3.6.3	OPERAÇÃO DE CHAVES .....	23
3.6.4	MAPEAMENTO DOS CHAMADOS .....	23
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	<b>25</b>
4.1	TESTE DOS MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS .....	25
4.2	DESEMPENHO DO ALGORITMO ADAPTADO .....	28
4.3	ESTUDOS DE CASO .....	31
4.3.1	CASO 1: OCORRÊNCIA DE CABO PARTIDO .....	31
4.3.2	CASO 2: OCORRÊNCIA DE CAUSA NÃO IDENTIFICADA .....	35
4.4	CONCLUSÕES SOBRE A APLICAÇÃO DA METODOLOGIA .....	38
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>39</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>41</b>

<b>APÊNDICES</b> .....	<b>42</b>
I.1      INFORMAÇÕES SOBRE O ALIMENTADOR MODELADO .....	42
I.2      RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO 1.....	47
I.3      RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO 2.....	50



## LISTA DE FIGURAS

2.1	Representação do sistema homogêneo (1).....	6
2.2	Representação do circuito sob falta (1).....	7
2.3	Circuito de sequência zero durante falta à terra (1). ....	11
2.4	Ilustração do problema das múltiplas estimações.....	12
3.1	Passos da metodologia proposta. ....	14
3.2	Topologia do alimentador analisado. ....	16
3.3	Ilustração de alguns segmentos de um alimentador radial.....	18
3.4	Posicionamento dos religadores no alimentador. ....	22
4.1	Erro percentual de estimacão para os tipos de faltas simulados.....	27
4.2	Comportamento do erro percentual de estimacão para o método adaptado.....	29
4.3	Ajuste da curva normal ao histograma de erros médios.....	30
4.4	Densidade de probabilidade da curva normal ajustada.....	30
4.5	Local da ocorrência de cabo partido. ....	32
4.6	Pontos estimados por segmento para caso de cabo partido.....	33
4.7	Trechos estimados pelo algoritmo.....	34
4.8	Locais de maior número de ocorrências de cabos partidos em rede convencional ...	35
4.9	Local da ocorrência de causa não identificada.....	35
4.10	Pontos estimados por segmento para caso de cabo partido.....	36
4.11	Trechos estimados pelo algoritmo.....	37
4.12	Locais com maior número de ocorrências de causa não identificada.....	37

## LISTA DE TABELAS

2.1	Equações de impedância de sequência positiva $mZ_{1L}$ .....	7
2.2	Equações de corrente de superposição $I_{sup}$ . ....	10
4.1	Taxas de faltas por 100 km/ano (2).....	25
4.2	Intervalos de erros para cada tipo de falta. ....	31
4.3	Informações sobre a ocorrência de cabo partido. ....	32
4.4	Informações sobre a ocorrência de causa não identificada .....	36
1	Características dos vãos.....	42
2	Resultado da aplicação do algoritmo para caso de cabo partido. ....	47
3	Resultado da aplicação do algoritmo para caso de defeito com causa não identificada. ....	50

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Latinos

$\hat{I}_A$	Fasor de corrente na fase A	[A]
$\hat{I}_B$	Fasor de corrente na fase B	[A]
$\hat{I}_C$	Fasor de corrente na fase C	[A]
$\hat{I}_{pf}$	Fasor de corrente pré-falta	[A]
$\hat{I}_{A,pf}$	Fasor de corrente pré-falta na fase A	[A]
$\hat{I}_{B,pf}$	Fasor de corrente pré-falta na fase B	[A]
$\hat{I}_{C,pf}$	Fasor de corrente pré-falta na fase C	[A]
$\hat{I}_{AB}$	Fasor de corrente entre as fases A e B	[A]
$\hat{I}_{BC}$	Fasor de corrente entre as fases B e C	[A]
$\hat{I}_{CA}$	Fasor de corrente entre as fases C e A	[A]
$\hat{I}_F$	Fasor de corrente de falta	[A]
$\hat{I}_R$	Fasor de corrente do terminal remoto	[A]
$\hat{I}_S$	Fasor de corrente do terminal local	[A]
$\hat{I}_{0S}$	Fasor de corrente de sequência zero do terminal local	[A]
$\hat{I}_{sup}$	Fasor de corrente de superposição	[A]
$m$	Distância para a falta	[p.u.]
$R_F$	Resistência de falta	[ $\Omega$ ]
$\hat{V}_A$	Fasor de tensão na fase A	[V]
$\hat{V}_B$	Fasor de tensão na fase B	[V]
$\hat{V}_C$	Fasor de tensão na fase C	[V]
$\hat{V}_{AB}$	Fasor de tensão entre as fases A e B	[V]
$\hat{V}_{BC}$	Fasor de tensão entre as fases B e C	[V]
$\hat{V}_{CA}$	Fasor de tensão entre as fases C e A	[V]
$\hat{V}_R$	Fasor de tensão no terminal remoto	[V]
$\hat{V}_S$	Fasor de tensão no terminal local	[V]
$\hat{V}_{0S}$	Fasor de tensão de sequência zero do terminal local	[V]
$X_{1L}$	Reatância de sequência positiva da linha	[ $\Omega$ ]
$Z_{aparente}$	Impedância aparente da linha vista pelo relé	[ $\Omega$ ]
$Z_{estimada}$	Impedância da linha estimada pelo algoritmo	[ $\Omega$ ]
$Z_L$	Impedância da linha	[ $\Omega$ ]
$Z_{0L}$	Impedância de sequência zero da linha	[ $\Omega$ ]
$Z_{1L}$	Impedância de sequência positiva da linha	[ $\Omega$ ]
$Z_{2L}$	Impedância de sequência negativa da linha	[ $\Omega$ ]
$Z_{0S}$	Impedância de sequência zero do terminal local	[ $\Omega$ ]

$Z_{1S}$	Impedância de sequência positiva do terminal local	[ $\Omega$ ]
$Z_{0R}$	Impedância de sequência zero do terminal remoto	[ $\Omega$ ]
$Z_{1R}$	Impedância de sequência positiva do terminal remoto	[ $\Omega$ ]

### Símbolos Gregos

$\beta$	Grau de não-homogeneidade do sistema
$\mu$	Média populacional
$\sigma$	Desvio padrão

### Grupos Adimensionais

$e$	Número de Euler
$K$	Fator de compensação de sequência zero
$n$	Número de elementos na amostra
$\bar{X}$	Média amostral para uma amostra aleatória simples

### Siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Os sistemas de distribuição de energia elétrica constituem a maior parte das ligações entre a fonte e os consumidores. Por esta razão, a continuidade e a qualidade no fornecimento de energia elétrica são fatores essenciais. Para assegurar essas condições, os sistemas de distribuição de energia elétrica estão passando por grandes transformações, aumentando o nível de automação e adicionando infraestrutura de comunicação e informação para monitoramento, operação e controle. Tais modernizações no sistema criam condições para viabilizar a operação de redes elétricas inteligentes.

Por muitos anos, o sistema de distribuição de energia elétrica foi considerado relativamente simples, uma vez que apresentavam pouco ou nenhum tipo de automação e controle ao longo da rede, apenas nas subestações. Ainda que de forma lenta, este cenário vem sendo modificado com o surgimento do conceito de *Smart Grids* que requer grandes investimentos em automação e controle ao longo da rede e para permitir a realização de novos estudos visando proporcionar maior flexibilidade ao sistema (3). Entretanto, este movimento ainda é lento no segmento de distribuição de energia (4). Nas últimas décadas, apesar do incremento na qualidade do serviço prestado pelas companhias de energia elétrica, o modelo de negócios destas empresas não sofreu grandes alterações.

No Brasil, sabe-se que a maior parte das redes de distribuição são aéreas (5). Os alimentadores aéreos de distribuição estão sujeitos a diversas causas de interrupções, tais como: vandalismo, árvores ou outros objetos na rede e condições climáticas adversas (descargas atmosféricas, vento, tempestade...). Essa variedade de causas de interrupções torna difícil a identificação e localização de faltas, as quais são tarefas de grande importância. A detecção de faltas de forma eficiente, bem como a localização desses eventos no sistema é uma das tarefas mais importantes devido ao impacto delas sobre a operação e manutenção da rede.

O estudo da localização de faltas teve origem nos sistemas de transmissão e passou a ser estudada para aplicações em sistemas de distribuição apenas na década de 1980, por meio do desenvolvimento de diversas metodologias (6). Entretanto, em muitos casos, a localização de faltas em sistemas de distribuição é realizada por meio de métodos que não utilizam sequer medições de grandezas elétricas. Nestes casos, a atuação de religadores e chaves fusíveis indicam o trecho no qual, possivelmente, a falta está localizada. Já em casos de atuação da proteção somente na subestação, com base em relatos de profissionais de empresas distribuidoras de energia elétrica, a localização do defeito e restabelecimento do sistema são realizados por métodos de "tentativa e erro", realizando chaveamento de trechos do alimentador e verificando se a carga é aceita.

Os processos de identificação e localização de faltas adotados pelas distribuidoras dependem,

muitas vezes, de iteração humana, o que eleva consideravelmente o tempo de localização do defeito, além de impossibilitar a ação em casos de faltas transitórias. Este fato é crítico, uma vez que impactam negativamente os indicadores de duração e frequência equivalentes de interrupção por unidade consumidora (DEC e FEC), e a deterioração destes indicadores pode desencadear, por conseguinte, ações punitivas à Distribuidora por parte da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e compensações financeiras para os consumidores (7). Ademais, a imprecisão na localização de defeitos acarreta investimentos por vezes não assertivos ou exagerados na rede por parte da companhia.

Diante do contexto apresentado, diversos métodos para localização de faltas vêm sendo desenvolvidos nos últimos anos, sejam para sistemas de transmissão ou distribuição de energia, e eles podem ser classificados em quatro grupos distintos (8). São eles:

- Métodos baseados em componentes de frequência fundamental;
- Métodos baseados na teoria de ondas viajantes;
- Métodos baseados em componentes em altas frequências;
- Métodos baseados em inteligência artificial.

A análise das componentes de frequência fundamental com a finalidade de estimar o local da falta parte da estimação dos fasores de tensão e corrente no ponto de medição. Baseando-se nas variações de módulo e fase de tensões e correntes durante a falta, é possível estimar o local do defeito com precisão aceitável por meio do cálculo da impedância da linha durante a falta. Os algoritmos baseados neste princípio são muito utilizados na prática e amplamente difundidos na literatura em razão do baixo custo de implementação e da exigência de menor esforço computacional (9).

Os algoritmos de localização de faltas baseados na teoria de ondas viajantes e nas componentes de alta frequência são fundamentados na análise dos transitórios das medidas de tensão e corrente durante a falta. Estes métodos analisam as grandezas envolvidas na falta por meio de análise espectral dos transitórios no momento do defeito ou relacionam os instantes de incidência de ondas viajantes nos terminais monitorados com o ponto estimado para a falta (9). O local da falta é estimado a partir do tempo de propagação das ondas viajantes, posto que, quanto menor a distância entre o ponto de medição e o defeito, menor o tempo para a onda viajante se propagar.

Por fim, algoritmos baseados em inteligência artificial são fundamentados no reconhecimento de padrões em registros de medidas e comportamentos da rede durante faltas anteriores. Algoritmos deste tipo visam evitar as fontes de erros que causam estimativas errôneas nos métodos anteriores, de modo que podem ser baseados em análises de transitórios ou mesmo de componentes fundamentais (8).

Embora exista uma grande evolução nas metodologias para localização de faltas propostas no decorrer dos anos, ainda existe o desafio das múltiplas estimações na aplicação destes métodos,

em especial em sistemas radiais e com ramificações laterais, como é o caso dos circuitos de média tensão das distribuidoras (10).

No caso da implementação de métodos baseados em teoria de ondas viajantes, este problema tem origem no fato de que, com a existência de diversos pontos de ramificação no decorrer do circuito, as ondas viajantes acabam se propagando por esses ramais, gerando estimativas distorcidas para o local da falta. Já em métodos baseados em componentes de frequência fundamental, a existência de diversos pontos possíveis para o local da falta que estão à mesma distância elétrica do terminal de observação provoca múltiplas estimativas, dentre as quais apenas uma deve ser considerada. Por isso, além do problema da localização de faltas, pesquisadores têm também envidado esforços para o desenvolvimento de metodologias que superem a problemática das múltiplas estimativas.

## **1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO**

Tendo em vista a necessidade de implementar ferramentas para melhoria da continuidade do fornecimento de energia de forma efetiva, propõe-se um método de localização de faltas baseado em frequência fundamental adaptado para ser utilizado em alimentadores de distribuição de média tensão e que apresenta precisão aceitável.

Este trabalho apresenta uma metodologia de localização de faltas baseada em algoritmos que usam componentes de frequência fundamental adaptada para a aplicação em alimentadores de distribuição de energia em média tensão. Com a finalidade de reduzir os efeitos das múltiplas estimativas, após a redução da zona de busca do defeito em questão, é sugerida uma análise de registros históricos de interrupções a fim de encontrar padrões de comportamento do alimentador. O método proposto tem o objetivo de reduzir o raio de buscas por defeitos na rede e, consequentemente, reduzir significativamente o tempo de recomposição do sistema, por meio da atuação direta no componente TMD do Tempo Médio de Atendimento à Emergências (TMAE) (7), uma vez que, se a equipe de campo já conhece o local do defeito, não haverá a necessidade de despendar tempo nas buscas.

## **1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO**

O presente trabalho é estruturado da seguinte forma:

- No Capítulo 2 são abordados conceitos relacionados à localização de faltas, apresentados métodos baseados em componentes de frequência fundamental e descrito o problema das múltiplas estimativas decorrente da aplicação de tais métodos ;
- No Capítulo 3 são apresentados todos os passos da metodologia empregada na realização

deste trabalho;

- No Capítulo 4 são apresentados e analisados os resultados obtidos a partir das simulações computacionais e das análises de dados;
- No Capítulo 5 são realizadas as conclusões dos resultados obtidos e apresentadas propostas para trabalhos futuros.



## 2 FUNDAMENTOS DA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS BASEADA EM COMPONENTES DE FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL

Os métodos de localização de faltas baseados em componentes de frequência fundamental são de simples implementação e de menor custo. Eles baseiam-se na análise do comportamento dos fasores de tensão e corrente medidos nos terminais da linha para estimar o ponto do defeito (8). Existem diversas metodologias para localização de faltas baseadas neste princípio e elas podem ser aplicadas para sistemas com um, dois ou mais terminais, sendo as duas primeiras categorias mais comuns em aplicações reais.

Métodos de localização de faltas utilizando dados de dois terminais são mais precisos, entretanto são mais caros e complexos para implementação em campo, uma vez que necessitam de canal de comunicação e tipicamente meios de sincronização de dados para que sejam processados os dados de medição de ambos os terminais (11). Já as metodologias de um terminal, de mais simples implementação, são as mais adequadas para alimentadores primários de distribuição que, em sua maioria, apresentam medições confiáveis realizadas apenas na subestação, impossibilitando o uso de informações em pontos remotos do alimentador.

A seguir são apresentados alguns métodos de localização de faltas baseados em componentes de frequência fundamental que utilizam informações de um terminal. As metodologias apresentadas serão utilizados como subsídio para os estudos subsequentes.

### 2.1 ALGORITMOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE UM TERMINAL

Algoritmos de localização de faltas baseados em frequência fundamental de um terminal são aqueles capazes de estimar o local da falta a partir do valor de impedância aparente vista de apenas um terminal. Estes se mostram como sendo os mais simples e por muitas vezes os mais adequados a serem implementados em alimentadores aéreos de média tensão, uma vez que grande parte dos sistemas deste tipo apresentam característica radial, cujas medições são realizadas apenas na subestação de distribuição.

Das *et al.* (2014) apresentam os seguintes pontos como vantagens de se utilizar métodos de localização de faltas de um terminal:

- Algoritmos deste tipo podem ser diretamente implementados;
- As estimativas de locais de faltas apresentam precisão razoável;
- São exigidas medições de apenas um terminal;

- Não são necessários canais de comunicação ou uso de dados remotos, exceto no caso de levar a estimativa da falta até o centro de operação da distribuidora, por exemplo;
- O algoritmo pode ser implementado na própria subestação por meio de algum relé numérico microprocessado.

A Figura 2.1 apresenta uma linha de transmissão de dois terminais que será utilizada para ilustrar os métodos apresentados adiante. Pressupõe-se que esta linha de transmissão é homogênea, ou seja, as impedâncias do sistema apresentam ângulos iguais. Os sistemas à montante do terminal  $S$  e à jusante de do terminal  $R$  são representados por seus circuitos equivalentes de Thévenin, cujas resistências de sequência positiva são  $Z_{1S}$  e  $Z_{1R}$ , respectivamente. Para a implementação de algoritmos de localização de faltas de um terminal, serão utilizados fasores de tensão e corrente aferidos em apenas um dos terminais, o terminal local  $S$ .

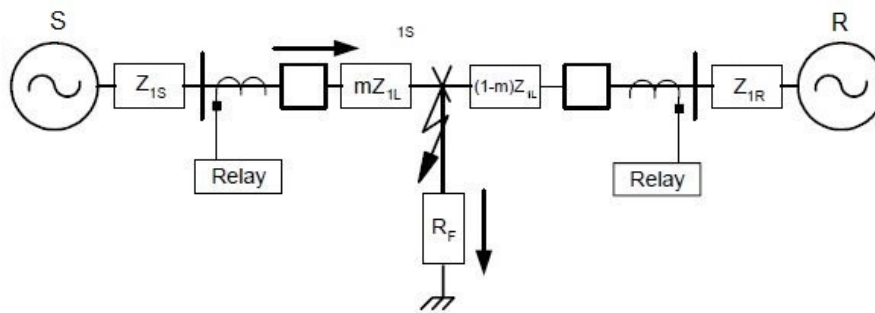


Figura 2.1: Representação do sistema homogêneo (1).

A Figura 2.2 mostra que, na ocorrência de uma falta com resistência  $R_F$ , no sistema ilustrado em que máquinas elétricas se encontram conectadas nas duas extremidades do sistema, ambos os terminais contribuirão para a formação da corrente de falta  $\hat{I}_F$ . Portanto, a queda de tensão no terminal  $S$  é dada por:

$$\hat{V}_S = m \cdot Z_{1L} \cdot \hat{I}_S + R_F \cdot \hat{I}_F \quad (2.1)$$

Onde  $\hat{V}_S$  é a tensão no terminal  $S$ ,  $m$  é a distância entre o terminal de observação e a falta, em *p.u.*, e  $Z_{1L}$  a impedância total de sequência positiva da linha.

Para que seja possível localizar todos os tipos de faltas no sistema, é necessário conhecer, também, as tensões e correntes fase-terra de cada uma das fases compensando os efeitos da corrente de sequência zero em loops de faltas monofásicas. Conhecendo-se apenas tensões e correntes de linha do sistema, é possível localizar somente faltas entre fases. Assumindo-se resistência de falta  $R_F$  nula, a impedância de sequência positiva da linha  $mZ_{1L}$  é calculada conforme apresentado na Tabela 2.1. É possível, então, estimar o local da falta ao encontrar  $m$ .



$$Z_{aparente} = \frac{\hat{V}_S}{\hat{I}_S} = m \cdot Z_{1L} + R_F \cdot \left( \frac{\hat{I}_F}{\hat{I}_S} \right) \quad (2.3)$$

Na Equação (2.3) é possível notar a existência de três variáveis, são elas:  $m$ ,  $R_F$  e  $\hat{I}_F$ . Isso acontece, pois são aferidas medidas de apenas um terminal da linha. Objetiva-se, portanto, eliminar  $R_F$  e  $\hat{I}_F$  da Equação (2.3) por meio de algum algoritmo de localização de faltas. São apresentados a seguir os desenvolvimentos de três algoritmos baseados em componentes de frequência fundamental com o objetivo de embasar a escolha do método utilizado no desenvolvimento deste estudo.

### 2.1.1 Método da Impedância

Este é o mais simples dos métodos de localização de faltas baseados em componentes de frequência fundamental, pois utiliza apenas o valor de impedância aparente medida pelo relé e o compara com a impedância já conhecida da linha por meio da Equação (2.4).

Este método apenas compara impedância de sequência positiva calculada a partir da Tabela 2.1 com a impedância de sequência positiva total da linha, assumindo que seus parâmetros são conhecidos. A razão entre estes valores resulta na fração da linha  $m$  no qual a falta está localizada, conforme mostrado na Equação (2.4).

$$m = \left| \frac{Z_{estimada}}{Z_{1L}} \right| \quad (2.4)$$

Este método apresenta baixa precisão, uma vez que apenas leva em consideração o módulo da impedância de sequência positiva da linha, desconsiderando totalmente os fatores a seguir:

- Efeito combinado de resistência de falta e carga;
- Impedância mútua de sequência zero entre o circuito e o retorno para a terra;
- Erros de modelagem do circuito de sequência zero;
- Não homogeneidades do sistema.

Outras abordagens, como as apresentadas a seguir, apresentam alternativas para mitigar estes efeitos como forma de melhorar a estimativa do local da falta. Entretanto é necessário ter em mente que todos estes fatores influenciam negativamente a precisão das metodologias baseadas em componentes de frequência fundamental.

### 2.1.2 Método da Reatância Simples

Este método parte do pressuposto que a resistência de falta  $R_F$  possui natureza puramente resistiva e que o sistema é perfeitamente homogêneo. O objetivo desta metodologia é minimizar os efeitos de  $R_F \cdot \hat{I}_F$  (1). Portanto, considera-se que  $\hat{I}_S$  e  $\hat{I}_F$  estejam em fase, deste modo o termo  $R_F \cdot \left(\frac{\hat{I}_F}{\hat{I}_S}\right)$  da Equação (2.3) é um número real.

Considerado-se apenas a parte imaginária dos termos da Equação (2.3), é possível encontrar a distância em *p.u.* entre o terminal de observação  $S$  e o local da falta como sendo:

$$m = \frac{Im\left(\frac{\hat{V}_S}{\hat{I}_S}\right)}{X_{1L}} \quad (2.5)$$

Nota-se que o método da reatância simples estima a reatância entre o terminal observado e o local da falta. Apesar de sua fácil implementação, este método possui baixa precisão na estimação do local da falta, pois parte do pressuposto que  $\hat{I}_S$  e  $\hat{I}_F$  estejam em fase. Neste caso, o erro na estimação do local da falta é nulo. Entretanto, quando da presença de cargas no sistema durante a falta, isto deixa de ser verdade. Ademais, se o sistema é não-homogêneo,  $\hat{I}_R$  e  $\hat{I}_S$  são defasados, de modo que, na ocorrência de um defeito,  $\hat{I}_S$  e  $\hat{I}_F$  também tornam-se defasados. Conseqüentemente, o termo  $R_F \cdot \left(\frac{\hat{I}_F}{\hat{I}_S}\right)$  é um número complexo e acrescenta uma reatância à falta. Se  $\hat{I}_F$  está adiantado com relação à  $\hat{I}_S$ , o método superestima o local da falta, pois o termo  $R_F \cdot \left(\frac{\hat{I}_F}{\hat{I}_S}\right)$  é indutivo e isso faz com que o valor da impedância aparente seja maior. Se  $\hat{I}_F$  está atrasado com relação à  $\hat{I}_S$ , o termo  $R_F \cdot \left(\frac{\hat{I}_F}{\hat{I}_S}\right)$  torna-se capacitivo e o método subestima o local da falta, já que há uma redução no valor da impedância aparente.

### 2.1.3 Método de Takagi simples

Takagi *et al.* (1982) apresentam um método de localização de faltas baseado no cálculo da reatância de uma linha em falta usando informações de tensão e corrente de apenas um terminal de uma linha de transmissão. Este método apresenta melhor desempenho com relação ao método da reatância simples apresentado anteriormente, pois reduz os efeitos do fluxo de carga e da resistência de falta (1).

Neste desenvolvimento é usado o princípio da superposição que decompõe o sistema em pré-falta e falta pura, ou seja, este método demanda conhecimento de tensões e correntes nestes dois momentos, os quais são tomados tipicamente das oscilografias antes do momento da falta e durante o regime permanente de falta, respectivamente. Deste modo, considera-se:

$$\hat{I}_{sup} = \hat{I}_F - \hat{I}_{pf} \quad (2.6)$$

onde,  $\hat{I}_{sup}$  é a corrente de superposição, expressa na Tabela 2.2 para cada tipo de falta,  $\hat{I}_F$  representa a corrente de falta em determinada fase e  $\hat{I}_{pf}$  a corrente de pré-falta.

Tabela 2.2: Equações de corrente de superposição  $I_{sup}$ .

Tipo de Falta	Corrente incremental
A-Terra	$\hat{I}_A - \hat{I}_{A,pf}$
B-Terra	$\hat{I}_B - \hat{I}_{B,pf}$
B-Terra	$\hat{I}_C - \hat{I}_{C,pf}$
A-B, A-B-Terra, A-B-C	$(\hat{I}_A - \hat{I}_{A,pf}) - (\hat{I}_B - \hat{I}_{B,pf})$
B-C, B-C-Terra, A-B-C	$(\hat{I}_C - \hat{I}_{C,pf}) - (\hat{I}_B - \hat{I}_{B,pf})$
C-A, C-A-Terra, A-B-C	$(\hat{I}_C - \hat{I}_{C,pf}) - (\hat{I}_A - \hat{I}_{A,pf})$

Multiplicando a Equação (2.1), que expressa a queda de tensão no barramento do terminal local, pelo complexo conjugado da corrente de superposição  $I_{sup}$ , temos:

$$\hat{I}_{sup}^* \cdot \hat{I}_S = \hat{I}_{sup}^* (m \cdot Z_{1L} \cdot \hat{I}_S) + \hat{I}_{sup}^* \cdot (R_F \cdot \hat{I}_F) \quad (2.7)$$

Tirando a parte imaginária dos elementos complexos que compõem a Equação (2.7) e fazendo as devidas manipulações, é possível estimar o local da falta por meio da seguinte equação:

$$m = \frac{Im(\hat{V}_S \cdot \hat{I}_{sup}^*)}{Im(Z_{1L} \cdot \hat{I}_S \cdot \hat{I}_{sup}^*)} \quad (2.8)$$

O método de Takagi *et al.* mostra-se bastante preciso ao estimar locais de defeitos cujas resistências de falta são nulas. O aumento da resistência de falta causa aumento elevado no erro de estimação do ponto da falta, uma vez que pode-se reduzir a contribuição de curto-circuito a qual, quando combinada com o carregamento do sistema, pode impor defasagens angulares entre as grandezas elétricas de interesse que resultam em erros adicionais. Ademais, este método assume um modelo de carga de corrente constante nos momentos pré e pós falta, o que também pode ser fonte de imprecisão.

#### 2.1.4 Método de Takagi Modificado

Este método de localização de faltas, também conhecido como Método Takagi de Corrente de Sequência Zero, evita o uso da corrente de pré-falta e é útil quando os registros oscilográficos de pré-falta não estão disponíveis. Por outro lado, este método faz uso da corrente de sequência zero do circuito, eliminando a necessidade de análise da corrente incremental  $\hat{I}_{sup}$  apresentada anteriormente. Esta substituição é possível, pois a corrente de sequência zero  $\hat{I}_{0S}$  existe apenas durante faltas à terra e é nula em sistemas balanceados, tal como no regime permanente de operação (11).

Tendo como base a Equação (2.8) e fazendo a modificação exposta acima, é possível, portanto, estimar a distância entre o terminal de observação e o ponto da falta a partir da seguinte expressão:

$$m = \frac{Im(\hat{V}_S \cdot 3\hat{I}_{0S}^*)}{Im(\hat{I}_{1L} \cdot \hat{I}_S \cdot \hat{I}_{0S}^*)} \quad (2.9)$$

O método Takagi Modificado também permite correção de ângulo a fim de compensar a não-homogeneidade do sistema. A Figura 2.3 mostra o funcionamento do circuito de sequência zero da rede durante a falta.

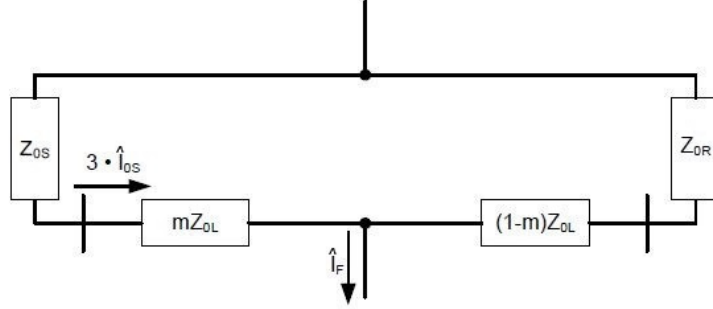


Figura 2.3: Circuito de sequência zero durante falta à terra (1).

Seja  $\beta$  o grau de não-homogeneidade do sistema calculado por meio da Equação (2.10), ao aplicar o ângulo de correção  $e^{-j\beta}$  ao local da falta estimado na Equação (2.9), a não homogeneidade do sistema será compensada, conseqüentemente, melhora a precisão do algoritmo (11).

$$\beta = \angle \left( \frac{Z_{0S} + Z_{0L} + Z_{0R}}{(1-m) \cdot Z_{0L} + Z_{0R}} \right) = \angle \left( \frac{\hat{I}_F}{3 \cdot \hat{I}_{0S} + Z_{0R}} \right) \quad (2.10)$$

Entretanto, como mostrado na Equação (2.10), para calcular  $\beta$  é necessário que  $m$  seja conhecido. Deste modo, o método Takagi Modificado consiste em estimar  $m$  por meio da Equação (2.9), então substituir este valor na Equação (2.10) a fim de encontrar o ângulo de correção do sistema e, por fim, estimar um novo  $m$  que considera tanto a carga quanto as não-homogeneidades da rede (11). A distância de falta estimada, após realizadas as devidas correções, é calculada por:

$$m = \frac{Im(\hat{V}_S \cdot 3 \cdot \hat{I}_{0S}^* \cdot e^{-j\beta})}{Im(Z_{1L} \cdot \hat{I}_S \cdot \hat{I}_{0S}^* \cdot e^{-j\beta})} \quad (2.11)$$

Para a utilização deste método de localização de faltas é necessário, entretanto, que seja conhecida a impedância de sequência zero equivalente do terminal remoto  $\hat{Z}_{0R}$ . Já a impedância do terminal local  $\hat{Z}_{0S}$  pode ser estimada por:

$$Z_{0S} = -\frac{\hat{V}_{0S}}{\hat{I}_{0S}} \quad (2.12)$$

## 2.2 O PROBLEMA DAS MÚLTIPLAS ESTIMAÇÕES

A desvantagem da localização de faltas que utilizam a abordagem de componentes de frequência fundamental em sistemas de distribuição é o problema das múltiplas estimações. A maioria dos alimentadores radiais de distribuição apresentam mais de um ponto cujas distâncias elétricas para a subestação são as mesmas (12), isto é, possuem mesma impedância equivalente.

Por consequência, esses métodos fornecem localizações precisas no que diz respeito à distância da falta, mas incertas, uma vez que diversas seções do alimentador possuem mesma distância elétrica, e ainda ocorre de, em diversos casos, esta seções estarem localizadas longe umas das outras (13). Essa é a principal desvantagem ao aplicar esses métodos em sistemas de potência reais, uma vez que a existência de vários locais de falha possíveis em uma grande área geográfica não resolve a necessidade real de restabelecimento rápido do sistema.

A Figura 2.4 ilustra o problema das múltiplas estimações do ponto da falta em um sistema de distribuição genérico. Neste caso, a utilização de um método de localização de faltas baseado em componentes de frequência fundamental a fim de localizar a falta no ponto  $F_1$ , encontra cinco possibilidades de localização da falta que possuem mesma reatância  $X_d$ , causando um problema de decisão de onde iniciar as buscas pelo defeito.

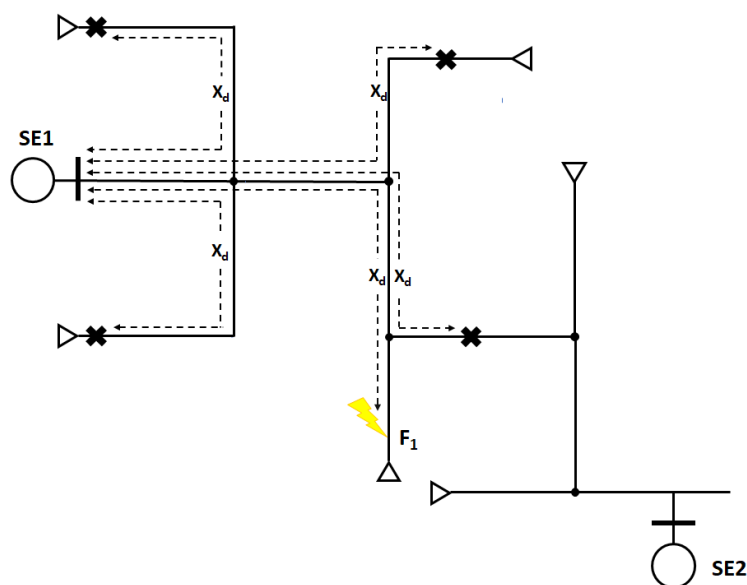


Figura 2.4: Ilustração do problema das múltiplas estimações.

Uma abordagem bastante comum na literatura com a finalidade de solucionar o problema das múltiplas estimações é a utilização de sensores de falta dispostos por todo o percurso do alimentador de modo a identificar e processar correntes e tensões durante a falta. Entretanto, esta metodologia não é a eficiente do ponto de vista econômico, uma vez que as companhias de distribuição possuem, em boa parte das vezes, uma grande quantidade de alimentadores em uma região geográfica extensa. Seria necessária, portanto, uma grande quantidade de equipamentos a serem instalados, bem como surgiria a demanda de manutenção e construção de infraestrutura de



comunicação, incrementando ainda mais os custos de implementação.

Neste trabalho será apresentada uma alternativa de simples implementação para solução deste problema, a partir da análise de históricos de eventos anteriores em determinado alimentador, e serão utilizadas de ferramentas computacionais e exemplos de casos reais a fim de verificar a eficácia da metodologia proposta.

### 3 METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia proposta neste trabalho trata da adaptação na implementação de métodos baseados em componentes de frequência fundamental para a localização de faltas em alimentadores primários de distribuição com característica radial, de modo a melhorar os resultados da implementação de algoritmos deste tipo. O problema das múltiplas estimações é atenuado por meio da identificação de padrões verificados em históricos de eventos anteriores. Objetiva-se, portanto, identificar regiões na extensão do alimentador nas quais há possibilidade da existência da falta a fim aumentar a assertividade das equipes da companhia e reduzir o tempo de localização e extinção do defeito.

A validação do método é realizada por meio de simulações de faltas utilizando um alimentador primário de 13,8 kV da CEB Distribuição modelado anteriormente no *software* ATP, que é capaz de simular redes de transmissão e/ou transmissão de energia elétrica, possibilitando análises em regime transitório ou permanente (14). O processamento dos dados e aplicação dos algoritmos de localização de faltas foram implementados em programa computacional matemático.

A Figura 3.1 apresenta os passos da metodologia aplicada. A metodologia aplicada passa pela aplicação dos diversos algoritmos de localização de faltas apresentados anteriormente a fim de encontrar aquele que possui desempenho mais adequado para o sistema analisado. Em seguida, são aplicadas as adaptações no alimentador de modo a aumentar a precisão do método por meio da estimação de trechos nos quais o defeito possa estar localizado. De posse destas informações, é possível realizar um tratamento estatístico para os erros de estimação com a finalidade de aumentar a confiabilidade do método. Por fim, a partir de dados históricos de eventos ocorridos no alimentador real, reduzem-se as múltiplas estimações provocadas pelo algoritmo e selecionam-se os trechos do alimentador nos quais existe a possibilidade que esteja localizada a falta.

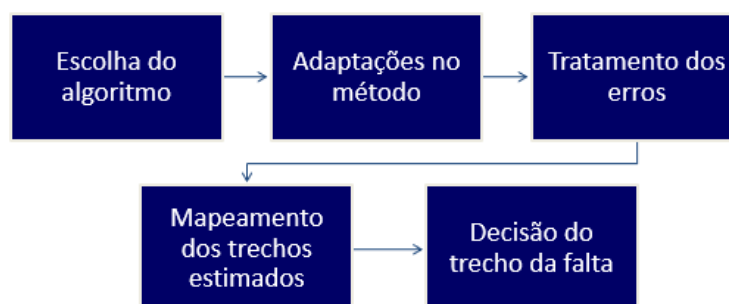


Figura 3.1: Passos da metodologia proposta.

### 3.1 SISTEMA ANALISADO

A fim de qualificar diversos métodos de localização de faltas com base na precisão da estimativa do local do defeito, foi modelado no *software* ATP um alimentador de rede aérea de 13,8 kV de característica urbana da CEB Distribuição. Levou-se em consideração na modelagem a carga instalada de cada um dos transformadores do circuito real, bem como a distância e os parâmetros dos cabos de cada vão ao longo do alimentador.

Este circuito, localizado na Região Administrativa do Lago Sul, atende cargas predominantemente residenciais, possui área de atendimento de aproximadamente 5,04 km<sup>2</sup>, extensão de 5,9 km, totalizando 25,04 km de rede, e é constituído de seis diferentes tipos de cabos. Ademais, existem dois religadores telecomandados instalados neste alimentador, dos quais é possível coletar dados oscilográficos e alarmes remotamente. A topologia deste alimentador, destacada em vermelho, é apresentada na Figura 3.2, que apresenta também o contexto geográfico no qual ele está inserido.

Este alimentador foi modelado no *software* ATP levando em consideração características dos cabos, distâncias entre vãos, topologia dos postes, capacidade e ligação dos transformadores. Foi adotado o modelo de cargas de impedância constante, com trechos de alimentador modelados a parâmetros concentrados usando o modelo pi-equivalente. Informações detalhadas sobre o alimentador encontram-se no Apêndice I.1. Também no ATP, foi utilizado um bloco de faltas configurável previamente modelado que tem como entradas o tipo da falta e a resistência de falta  $R_F$ . Este bloco simula um curto-circuito conforme as especificações de resistência e tipo de falta inseridas.

Os pontos de medição do circuito modelado são os mesmos disponíveis no circuito real, na subestação e nos religadores instalados na extensão do alimentador, conforme destacado na Figura 3.2. Neles são coletadas as informações que servirão de entrada para os algoritmos de localização de faltas implementados.

As medições coletadas no ATP são, então, inseridas em programa computacional para análises matemáticas, onde um programa realiza o tratamento dos dados, estima os fasores de tensão e corrente e aplica o algoritmo de localização de faltas, conforme os passos a seguir:

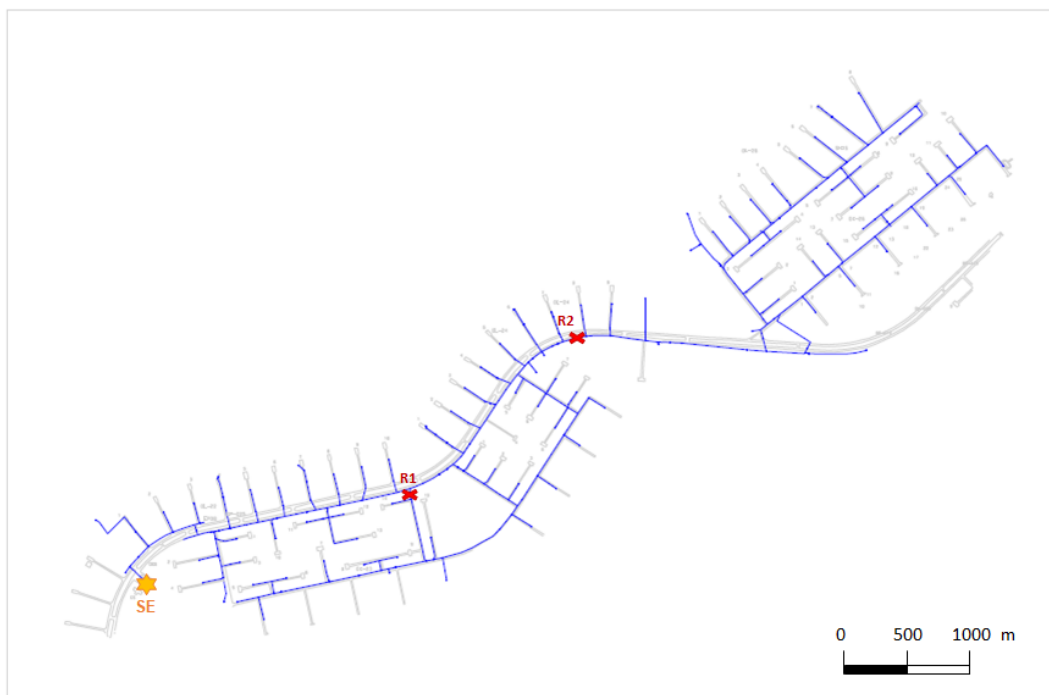
1. Definição dos parâmetros da simulação, tais como frequência do sistema, frequência de amostragem, parâmetros da linha e tipo de falta;
2. Realização da leitura dos arquivos com os sinais simulados no ATP e processamento destas informações;
3. Subamostragem dos sinais para fins de estimação fasorial;
4. Estimação dos fasores de tensão e corrente por meio do método cosseno modificado;
5. Cálculo das impedâncias aparentes vistas pelo relé;

6. Cálculo das grandezas de sequência positiva;
7. Aplicação do algoritmo de localização de faltas baseado em componentes de frequência fundamental.

Este algoritmo é capaz de simular adequadamente a aplicação da metodologia em um sistema real, onde as oscilografias reais seriam obtidas a partir de dispositivos registradores digitais disponíveis no sistema.



(a) Contexto geográfico do alimentador.



(b) Diagrama do alimentador

Figura 3.2: Topologia do alimentador analisado.

### 3.2 ESCOLHA DO ALGORITMO DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

Este trabalho visa a adaptação de processos típicos de localização de faltas baseados em componentes de frequência fundamental para emprego em alimentadores de média tensão de distribuição, a fim de melhorar a precisão da estimativa do local da falta e reduzir as múltiplas estimações, porém sem incorporar grande complexidade.

Partiu-se, portanto, da implementação dos diversos algoritmos de localização de faltas a partir de informações de um terminal a fim de encontrar aquele que possuía melhor desempenho no sistema modelado.

Após implementados e testados os algoritmos, volta-se para a rede modelada no ATP a fim de realizar os testes que irão qualificar os métodos. São simuladas faltas em todos os vãos do tronco do alimentador e, para cada falta, coletadas as medidas de tensão e corrente na subestação. Estas medidas servirão de entrada para o programa que implementa o método de localização de faltas e gera a estimativa para o local do defeito.

Por fim, para cada ponto de falta é calculado o erro de estimação, dado pela Equação (3.1), que calcula, de forma percentual, o erro de estimação com o comprimento total da linha. A análise do comportamento do erro percentual de estimação no decorrer do alimentador é um bom indicador de desempenho de cada método. Uma análise visual pode ser facilmente obtida a partir da plotagem de um gráfico que relaciona o percentual de erro de estimação com a distância do ponto real da falta.

$$erro = \left( \frac{d_{estimado} - d_{real}}{l_{linha}} \right) \times 100\% \quad (3.1)$$

sendo  $d_{estimado}$  a distância estimada para o local da falta,  $d_{real}$  a distância real do ponto do defeito e  $l_{linha}$  o comprimento total da linha, todos dados em km.

Para a continuação do trabalho é, então, escolhido o método de localização de faltas que apresenta melhor desempenho, isto é, cujo erro percentual de estimação desenvolve-se de maneira menos acentuada com o decorrer do alimentador. As simulações e análises realizadas a partir deste ponto levarão em conta os resultados obtidos a partir da implementação do algoritmo selecionado. Espera-se que, escolhendo o método que apresenta melhor precisão, serão necessárias menos adaptações para melhorar a precisão do processo de localização de faltas em estudo. Detalhes sobre esses testes e sobre a técnica escolhida serão apresentados posteriormente quando da análise de resultados.

### 3.3 ADAPTAÇÕES NO MÉTODO ESCOLHIDO

Após realizada a escolha do método de localização de faltas a ser utilizado nas análises posteriores, desenvolvem-se as adaptações neste método de modo a melhorar a precisão e reduzir ao máximo as múltiplas estimações decorrentes da existência de ramais laterais e cargas intermediárias ligadas ao tronco do alimentador. Esta tendência é facilmente ilustrada por meio de simulações.

Nesse sentido, propõe-se dividir o alimentador em segmentos para reduzir a influência das cargas intermediárias. Um segmento é definido como qualquer trecho entre o terminal de medição e o ponto de carga do alimentador de distribuição. Em termos concretos, um segmento é o trecho entre a subestação e o transformador de distribuição. Seja  $n$  o número de transformadores de distribuição em um alimentador, então este circuito possui  $n$  segmentos. A Figura 3.3 ilustra a definição de segmento de um alimentador radial de distribuição genérico. Por praticidade, os seguimentos do alimentador são numerados conforme os transformadores se afastam da subestação.

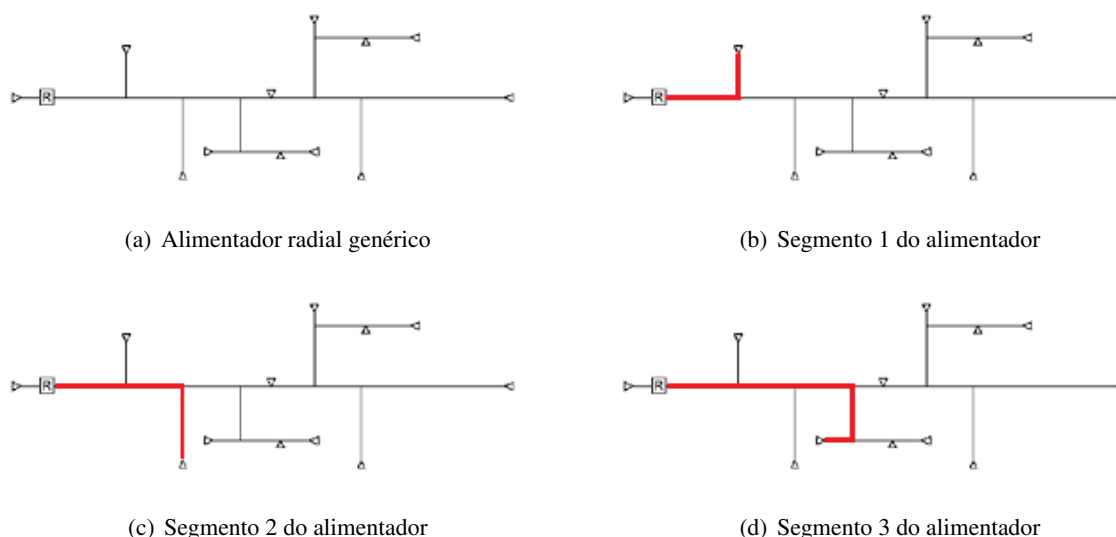


Figura 3.3: Ilustração de alguns segmentos de um alimentador radial.

Cada segmento tem características individuais de impedância de linha, uma vez que possuem diferentes comprimentos e são compostos por cabos distintos. Ambas as informações estão disponíveis para a realização deste trabalho. Na aplicação do algoritmo, cada segmento é visto como uma linha, com uma única carga conectada na sua extremidade e com impedância própria.

São realizados, então, os testes para descrever o comportamento do erro de estimação no decorrer do comprimento do segmento. Aplicam-se faltas em diversos pontos do alimentador a fim de comparar a distância estimada com a real. Para cada ponto, calcula-se o erro dado pela Equação (3.1). O comportamento destes erros é determinante para selecionar um intervalo de erro típico que será aplicado a fim de garantir confiabilidade ao método.

No caso real de ocorrência de um defeito no alimentador, o algoritmo é aplicado para cada um dos segmentos, estimando, portanto,  $n$  distâncias entre a subestação e a falta, onde  $n$  é o número de segmentos que possui o alimentador.

Nesta etapa, a informação do local da falta entregue pelo algoritmo é relevante, uma vez que destaca trechos no alimentador nos quais o defeito pode estar localizado, entretanto, não é pontual devido o efeito das múltiplas estimações, implicando na estimação de diversos trechos. O problema agora passa a ser identificar o trecho no qual a falta realmente está localizada dentro os trechos estimados pelo algoritmo, pois assim é possível atuar com precisão no restabelecimento do sistema.

### 3.4 TRATAMENTO DOS ERROS DE ESTIMAÇÃO

A fim de empregar um critério objetivo para qualificar e tratar o erro de estimação, é realizado um tratamento estatístico para os erros encontrados.

Seja  $X$  uma variável aleatória com média  $\mu$ , variância  $\sigma^2$  finita, e seja  $(X_1, \dots, X_n)$  uma amostra aleatória simples de tamanho  $n$  de  $X$ , com média amostral  $\bar{X} = (X_1 + \dots + X_n)/n$ , então:

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} \sim N(0, 1) \quad (3.2)$$

Pelo Teorema do Limite Central, para amostras aleatórias simples  $(X_1, \dots, X_n)$  retiradas de uma população com média  $\mu$  e variância  $\sigma^2$  finita, a distribuição amostral da média  $\bar{X}$  aproxima-se, para  $n$  grande (superior a 20), de uma distribuição normal, com média  $\mu$  e variância  $\sigma^2/n$  (15).

Este resultado permite a realização de uma análise mais aprofundada do erro de estimação, uma vez que, como visto anteriormente, o algoritmo de localização de faltas tende a subestimar ou superestimar o local da falta a depender da característica da impedância de falta. A faixa de erro, determinada para cada tipo de falta, é estabelecida por meio de testes realizados em pelo menos 20 segmentos do alimentador. É simulada a falta em cada um dos vãos e calculado o erro percentual de estimação por meio da Equação (3.1). Em seguida, é calculado o erro de estimação médio para cada segmento e plotado o histograma destes valores, no qual é possível ajustar a curva normal e encontrar a média de erro  $\mu$  e a variância  $\sigma^2$  para cada tipo de falta, em cada segmento, ao ser aplicado o algoritmo adaptado.

Para a distribuição Normal, a proporção de valores caindo dentro de quatro desvios-padrão é de 95,44% (15), isto é, como a média dos erros segue distribuição Normal, é possível afirmar que a falta estará localizada no trecho estimado, ou dentro de um intervalo de quatro vezes o desvio-padrão à media, dois para mais e dois para menos, em 95,44% das vezes. Este trata-se de um intervalo de confiança conveniente para aplicações práticas, resultando em uma metodologia de localização de faltas que apresenta o trecho do defeito com boa confiabilidade.

### **3.5 MAPEAMENTO DOS TRECHOS ESTIMADOS**

Nesta etapa da implementação da metodologia é realizado o mapeamento detalhado do alimentador, utilizando-se dados do cadastro da rede da empresa. Dados confiáveis resultam em estimativas de local da falta confiáveis.

Neste mapeamento, são numeradas as estruturas que compõem o alimentador, bem como as distâncias de rede entre elas. Também são levados em consideração o tipo de cabo que compõe cada vão de modo a encontrar, da forma mais aproximada, a impedância da linha de cada segmento.

Quando da aplicação do algoritmo de localização de faltas escolhido, independente da extensão do segmento, é gerada uma estimativa cujo valor é compatível com o local da falta, entretanto ela não é válida quando a estimativa é maior do que o tamanho do segmento. Desta forma, o algoritmo resultará em diversas estimativas, uma para cada segmento, sendo possível criar um intervalo considerando a maior e a menor. O trecho no qual a falta está localizada é estimado como sendo o intervalo com limite inferior e superior das estimativas dos diversos segmentos.

A este intervalo, é aplicado o erro típico de estimação calculado conforme procedimento detalhado na seção anterior. Em seguida, de posse da extensão do trecho onde possa estar localizada a falta, cruza-se esta informação com os dados do cadastro a fim de destacar os vãos cuja distância entre eles e a subestação está contida no trecho estimado.

Sabe-se que, ao ser aplicado o algoritmo de localização de faltas para a metodologia proposta, são geradas  $n$  estimativas, sendo  $n$  o número de segmentos.

### **3.6 AUXÍLIO NA TOMADA DE DECISÃO EM CASO DE MÚLTIPLAS ESTIMAÇÕES**

Da aplicação do algoritmo conforme detalhado anteriormente, verifica-se que o problema das múltiplas estimações é amenizado, por meio da estimação de trechos no lugar de pontos, entretanto ele ainda existe quando da presença de ramificações no circuito que provoca a estimação de trechos em locais dispersos no alimentador.

Neste ponto, passa-se a observar padrões de ocorrências anteriores, como forma de tomar decisão de onde iniciar as buscas pelo defeito quando são estimados diversos trechos distintos no alimentador.

O objetivo é entregar ao operador da companhia de energia os trechos do circuito nos quais existe maior possibilidade de estar localizado o defeito dentre aqueles já destacados pelo algoritmo. Assim, o serviço de reparo da rede é otimizado e o tempo da interrupção reduzido.

A seguir são apresentados os critérios aplicados neste trabalho, bem como a forma com a qual as informações serão tratadas. É importante ressaltar que, de acordo com as informações



disponíveis na distribuidora, os critérios podem não ser aplicáveis, da mesma maneira que eles podem ser incrementados ou adicionados novos critérios. Estes parâmetros foram definidos com base nas informações disponibilizadas pela CEB Distribuição.

### 3.6.1 Posição de equipamentos de medição ou indicadores de falta

O posicionamento de determinado equipamento na rede pode ser um bom indicador de onde iniciar as buscas por um curto-circuito permanente <sup>1</sup>. Os religadores telecomandados, por exemplo, enviam seu estado para o centro de operação a todo instante. O caso de um religador que atuou <sup>2</sup> e permaneceu aberto indica uma falta permanente no trecho à jusante. Indicadores de falta e equipamentos de sensoriamento instalados na rede também fornecem a informação se existe um defeito à jusante.

A informação de alertas de atuação de equipamentos, em muitos casos, é de grande importância e elimina boa parte dos possíveis pontos nos quais o defeito pode estar localizado, em primeira análise. Este tipo de abordagem é comumente utilizado pelas companhias na busca por defeitos na rede. O método de procura por chaves fusíveis queimadas também é bastante comum e parte do mesmo princípio, apesar de tratar-se de um método que leva muito tempo e é passível de erros, uma vez que não é possível monitorar o estados dessas chaves no circuito. A metodologia proposta mostra-se eficaz em casos como este.

Neste trabalho, a abordagem do posicionamento de equipamentos que dão indícios se a falta ocorreu à jusante dele é utilizada por meio dos religadores telecomandados instalados neste circuito, identificados como *R1* e *R2*. Eles estão posicionados nos pontos indicados na Figura 3.4.

Para fins de análise, este alimentador pode ser dividido em três grandes blocos, conforme indicado na Figura 3.4: (i) trecho à jusante da subestação e à montante de ambos os religadores; (ii) trecho à jusante do religador *R1*, destacado em vermelho; (iii) trecho à jusante do religador *R2*, destacado em verde. Os blocos destacados representam as zonas de proteção de seus respectivos religadores. Um sinal de atuação no religador *R1*, por exemplo, indica que a falta está localizada à jusante deste equipamento, na zona destacada em vermelho. Esta informação proporciona redução de 75,6% no campo de busca pelo defeito.

A lembrar que, ao implementar o algoritmo de localização de faltas, são encontrados  $n$  pontos, onde  $n$  representa a quantidade de segmentos do circuito, que no caso do alimentador em estudo é 91. Analisa-se, portanto, apenas os trechos estimados que estão localizados na zona destacada em vermelho na Figura 3.4. O mesmo princípio é válido para o caso de um sinal de atuação do religador *R2*.

Ademais, é importante destacar que toda a corrente que atende às cargas que encontram-se no trecho destacado em vermelho na Figura 3.4 passa pelo religador *R1* em condições normais

<sup>1</sup>Um curto-circuito permanente é aquele que não é extinto espontaneamente. Caso contrário, o curto-circuito é transitório.

<sup>2</sup>Os religadores têm a função de atuar em caso de curtos circuitos transitórios, realizando tentativas de religamento após tempos programados na tentativa de evitar a atuação da proteção de retaguarda. Caso o curto-circuito seja permanente, as tentativas de religamento falham e o religador mantém o trecho do defeito isolado.

de operação. Os demais ramais que ligam este trecho ao tronco do circuito operam com chaves NA de modo a isola-lo do tronco. Esta configuração provém maior controle sobre a corrente que atende às cargas citadas e melhor operabilidade em casos de contingências, ambos por meio do religador *R1*.

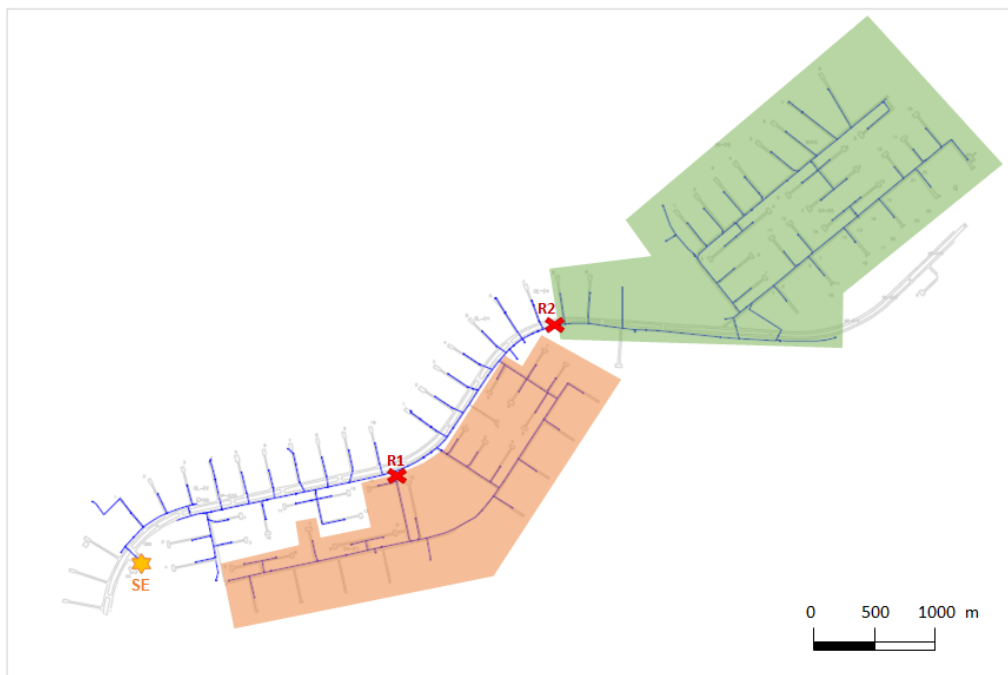


Figura 3.4: Posicionamento dos religadores no alimentador.

### 3.6.2 Características construtivas do alimentador

As informações presentes no cadastro da empresa relacionadas às características construtivas do alimentador podem ajudar também a mapear pontos mais suscetíveis a determinados tipos de faltas, neste caso, faltas ocorridas em trechos de rede convencional.

As redes aéreas de distribuição de energia podem ser classificadas entre compactas e convencionais. As redes aéreas de distribuição convencionais são caracterizadas pelo emprego de condutores nus, apoiados sobre isoladores de vidro ou porcelana, fixados horizontalmente sobre cruzetas em formato "T" nos circuitos de média tensão. A rede fica, portanto, sujeita à influências do meio ambiente, além de apresentar altas taxas, exigindo frequentes intervenções da manutenção.

As redes aéreas compactas surgiram como solução para os baixos índices de confiabilidade das redes convencionais. Este tipo de rede é composta por um conjunto de cabos de alumínio protegidos distanciados por espaçadores e fixados em estruturas por braços metálicos. Estes itens são sustentados por um cabo de aço guia, também utilizado como neutro do sistema. Ademais, as redes aéreas compactas beneficia o meio ambiente, uma vez que reduz a necessidade de podas de árvores e não utiliza cruzetas ou outros componentes de madeira.

Essas características do sistema dizem muito sobre a confiabilidade da rede elétrica e a probabilidade de ocorrência de faltas. É possível, portanto, relacionar as características construtivas da rede com pontos do alimentador nos quais há maior probabilidade de ocorrência de faltas. De acordo com as informações do cadastro da CEB-D, no circuito em estudo 63,7% de sua extensão total é de característica convencional. A baixa confiabilidade deste tipo de rede de distribuição torna estes trechos mais suscetíveis à ocorrência de defeitos. Esta informação poderá auxiliar no mapeamento das zonas de ocorrência de faltas proposto neste estudo.

Ademais, o cruzamento de informações do histórico de eventos do circuito é relevante em defeitos deste tipo. Isso por que, eventos de cabos partidos tendem à ocorrer de forma recorrente em pontos específicos, seja devido à variações abruptas de carga em determinado local de causam rompimento de cabos, seja por problemas em conexões realizadas em cabos partidos anteriormente. Eventos recorrentes de pontos específicos cujas causas são relacionadas à característica construtiva do alimentador podem indicar algum trecho por onde buscar pelo defeito.

### **3.6.3 Operação de chaves**

A análise do histórico de operações de chaves pode ser utilizado para indicar trechos do alimentador mais suscetíveis à defeitos recorrentes, bem como a identificação de manobras de recomposição do sistema realizadas anteriormente.

Associada às causas, a informação da operação de chaves no circuito indica trechos no alimentador nos quais os defeitos ocorrem com maior frequência e o motivo destas operações.

Por vezes, alguns trechos do sistema sofrem com interrupções recorrentes cujas causas não são identificadas. Em outros casos, operações de chaves de manobra do circuito indicam tentativas de restabelecimento de energia em casos de defeitos. Em ambas as situações, o mapeamento dos locais onde os defeitos ocorrem com maior frequência pode facilitar a tomada de decisão por parte do operador e da equipe de campo no momento da localização do defeito.

### **3.6.4 Mapeamento dos chamados**

Outra análise relevante com o intuito de reduzir o efeito das múltiplas estimações após a implementação do algoritmo trata-se do mapeamento dos chamados de clientes durante uma interrupção.

É comum que, durante uma interrupção de energia, a distribuidora não toma ciência do local exato do defeito, bem como de sua abrangência. Neste caso, o mapeamento dos chamados de clientes é útil no momento de escolher em qual trecho do alimentador a equipe pode começar sua atuação.

A partir nos dados cadastrais, é possível realizar o cruzamento do local do chamado com a base geográfica da empresa de modo a mapear o local do defeito. Entretanto, esta análise nem sempre é de fácil aplicação, pois a carência de informações ou a incompatibilidade dos sistemas

utilizados pode dificultar sua implementação.

Não foi possível levar em consideração este aspecto na realização das análises deste trabalho, uma vez que as informações necessárias não foram disponibilizadas, entretanto o mapeamento dos chamados pode ser uma ferramenta de grande potencial na redução da quantidade de trechos estimados pelo algoritmo e por esta razão merece ser mencionada.

## 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A fim de validar a metodologia proposta neste trabalho e detalhada no Capítulo 3, serão realizadas diversas simulações computacionais e análises de dados. Os resultados são, então, avaliados com o objetivo de julgar a funcionalidade e aplicabilidade do método proposto.

### 4.1 TESTE DOS MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

Para a escolha do método de localização de faltas a ser utilizado nos próximos passos deste estudo, são aplicadas faltas em cada um dos vãos do tronco do alimentador e comparada a distância real com a distância estimada por meio da Equação (3.1), que aponta a magnitude do erro de estimação. Foram simuladas faltas com as seguintes características:

1. Curtos-circuitos monofásicos na fase A com  $R_F = 0$ ;
2. Curtos-circuitos monofásicos na fase A com  $R_F = 40 \Omega$ ;
3. Curtos-circuitos francos entre as fases A e B e a terra;
4. Curtos-circuitos francos entre as fases A e B;
5. Curtos-circuitos trifásicos francos.

Tais características foram escolhidas com base na análise da taxa de faltas, que é definida como sendo o número esperado de faltas para cada 100 km de linha considerando um ano de operação. A Tabela 4.1 apresenta estatísticas de taxa de falta médias em redes de 13,8 kV. Deste modo é possível observar o comportamento do erro percentual de estimação de defeitos que abrangem a maior quantidade de ocorrências no sistema.

Tabela 4.1: Taxas de faltas por 100 km/ano (2).

<b>Tipo de falta</b>	<b>Taxa de falta</b>
Fase - Terra	78%
Bifásica - Terra	10%
Bifásica	9%
Trifásica	3%

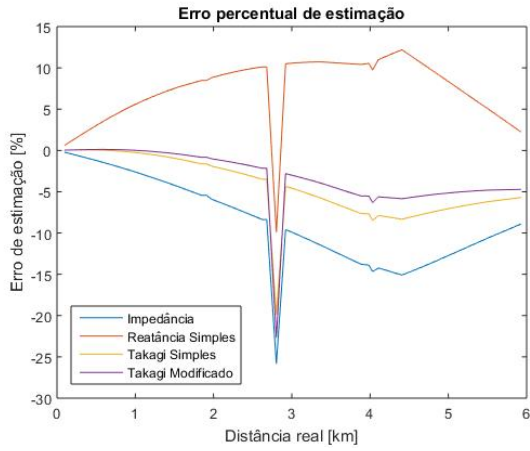
Ademais, para os tipos de falta cuja taxa de ocorrência é maior, neste casos faltas monofásicas, foram simulados também defeitos com resistência de falta não nula, já que este é o cenário mais comum. Valores típicos de impedância de falta da ordem de  $40 \Omega$  são mencionados em (16) para sistemas de média tensão. Neste trabalho, as simulações empregam impedância de falta com natureza puramente resistiva.

A Figura 4.1 apresenta o comportamento do erro percentual de estimação de cada um dos métodos de localização de faltas para cada tipo de curto-circuito simulado no alimentador em análise, com exceção do método Takagi Modificado que somente foi empregado em faltas à terra, já que faz uso de grandezas de sequência zero.

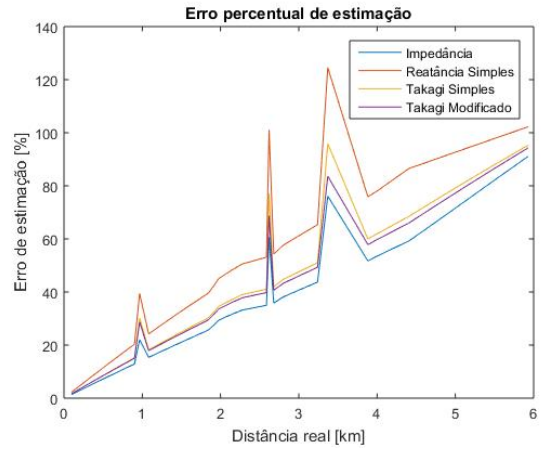
Observando-se a Figura 4.1 é possível realizar as seguintes considerações:

1. Para todos os tipos de falta foi possível perceber alguns picos no valor do erro percentual de estimação quando da ocorrência de ramais com cargas elevadas. Nestes pontos, a variação na corrente que passa pelo tronco do circuito provoca erros na estimativa do local da falta gerada por algoritmos de localização de faltas baseados em componentes de frequência fundamental. Desconsiderando-se as discrepâncias elevadas, pode-se perceber que existe comportamento linear do erro percentual de estimação no decorrer do alimentador, entretanto sua magnitude sofre grandes variações a depender do tipo de falta aplicada;
2. Em casos de faltas monofásicas com resistência de falta nula, a característica indutiva das cargas ao longo do circuito faz com que o local da falta seja subestimado, isto é, a distância estimada é menor do que a real, o que torna o erro negativo nos métodos Takagi Simples e Takagi Modificado. A defasagem entre as correntes de falta e do terminal provoca o resultado observado. Ademais, percebe-se uma redução no erro após 4,5 km de extensão do alimentador. Para este tipo de defeito, o algoritmo que apresentou melhor resultado foi o Takagi Modificado;
3. Em situações de faltas monofásicas com  $R_F = 40 \Omega$ , o desempenho dos algoritmos foi menos divergente, entretanto, como os métodos partem do pressuposto que a resistência de falta é nula, percebeu-se erros de estimação superiores a 100% ao alcançar o final do tronco do alimentador. Ademais, os pontos estimados para a falta são superestimados. Neste caso, método da impedância mostrou-se ligeiramente superior do que os demais. A diferença de desempenho entre os métodos Takagi Simples e Takagi Modificado não foi expressiva;
4. No caso de faltas entre duas fases nota-se a ocorrência de subestimação do local estimado para a falta. Percebe-se que para ambas as faltas o comportamento do erro é similar ao longo do alimentador e possui magnitude similar. Em faltas bifásicas, o método Takagi Modificado não pode ser aplicado já que não existe corrente de sequência zero. Para faltas bifásicas, o método que apresenta melhor desempenho foi o da Reatância Simples;
5. Em casos de defeitos trifásicos, o método Takagi Modificado também não pôde ser aplicado já que não existe corrente de sequência zero. Nota-se que o erro percentual de estimação apresenta valores bastante elevados, superiores a 400% no final do alimentador e, nos pontos onde estão localizados os ramais do circuito, o erro de estimação chega a alcançar 300%. Portanto, algoritmos de localização de faltas baseados em componentes de frequência fundamental comuns, ao serem aplicados para faltas trifásicas, apresentam desempenho desprovetável que inviabilizam a utilização do resultado em aplicações reais. Além disso,

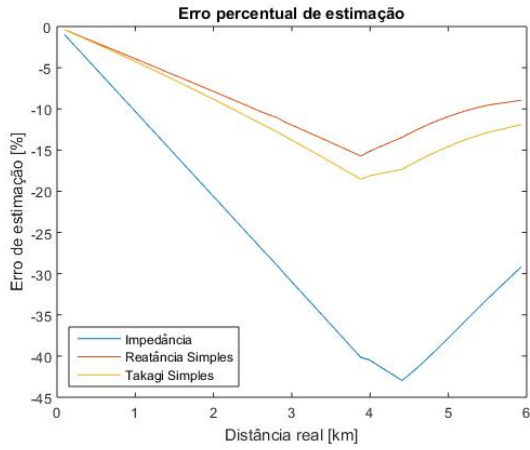
o método que apresenta desempenho ligeiramente superior é o método da Reatância Simples;



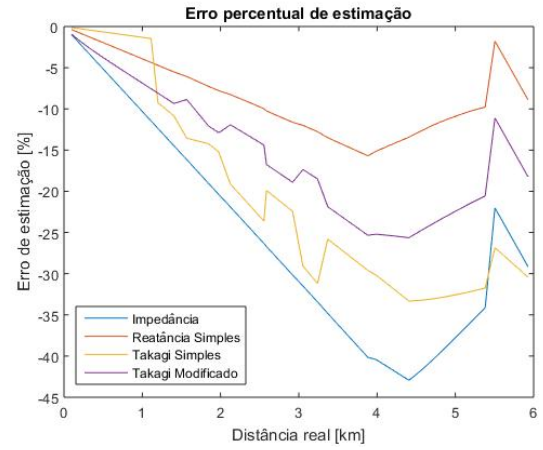
(a) Faltas monofásicas com  $R_F = 0$



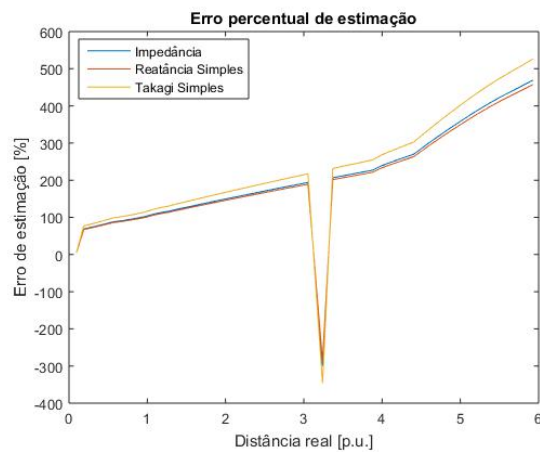
(b) Faltas monofásicas com  $R_F = 40\Omega$



(c) Faltas bifásicas



(d) Faltas bifásicas à terra



(e) Faltas trifásicas

Figura 4.1: Erro percentual de estimação para os tipos de faltas simulados

Da observação do comportamento do erro percentual de estimação para cada tipo de defeito simulado, percebe-se que este é dificilmente previsível e que a estimativa do ponto da falta é sensível à variações de carga no alimentador, como no caso dos ramais ligados ao tronco do circuito. Este resultado mostra que as metodologias de localização de faltas padrão ao serem empregadas em sistemas de distribuição de média tensão apresentam erros de estimação que tornam o método ineficientes para aplicação prática, além dos típicos problemas de múltiplas estimações não levados em consideração nesta análise. Torna-se necessária a realização de adaptações nestes métodos com a finalidade de melhorar seus desempenhos em casos de aplicações em sistemas de distribuição de energia.

Para dar continuidade ao desenvolvimento da metodologia proposta neste estudo, é necessário selecionar o método de localização de faltas que apresente desempenho mais adequado nos casos simulados anteriormente. O método a ser utilizado nas análises seguintes pode ser escolhido baseado na informação do tipo de defeito. Se o tipo da falta é conhecido, então escolhe-se aquele que, conforme os resultados anteriores, apresenta melhor desempenho para o defeito ocorrido. Caso não seja conhecido o tipo de falta, seleciona-se aquele que apresenta desempenho estável em todos os casos. Este último será o critério empregado neste estudo, de modo que possa ser criada uma estratégia genérica.

É escolhido, portanto, o método Takagi Simples, que pode se aplicado à qualquer tipo de falta e é o que apresenta resultados mais consistentes em todos os tipos de defeitos simulados. O método da Reatância Simples, cujo desempenho é superior em alguns casos, mostra-se muito divergente em casos de faltas monofásicas, com ou sem resistência de falta. A lembrar que este é o tipo de defeito cuja taxa de faltas em sistemas de distribuição é a mais elevada e merece maior peso no momento da escolha do algoritmo para seguir com a aplicação do método.

A partir da compreensão da metodologia proposta, podem ser realizadas as devidas adaptações em aplicações reais, incluindo na seleção do método a ser aplicado nos passos seguintes.

## **4.2 DESEMPENHO DO ALGORITMO ADAPTADO**

A análise a seguir leva em consideração a aplicação do método escolhido na seção anterior, o Método Takagi Simples, com os princípios da metodologia adaptada proposta no Capítulo 3. O desempenho desta metodologia é analisado com base no comportamento do erro percentual de estimação do algoritmo para faltas no decorrer de todo o do alimentador.

O alimentador modelado possui 91 segmentos, portanto são geradas, para cada ponto de aplicação do defeito na simulação, 91 estimativas de local da falta. A fim de analisar o comportamento do erro, são aplicadas faltas monofásicas com resistência nula em todos os vãos o alimentador e calculado o erro percentual conforme a Equação (3.1). A Figura 4.2 apresenta resultado destes testes para os 10 segmentos de maior comprimento, de modo que a visualização do gráfico não fique poluída. Foram selecionados os maiores comprimentos como forma de verificar com maior



clareza o comportamento do erro tanto próximo, quanto à maiores distâncias da subestação. O comportamento dos segmentos selecionados é típico, portanto a não representação dos demais segmentos não irá influenciar a análise.

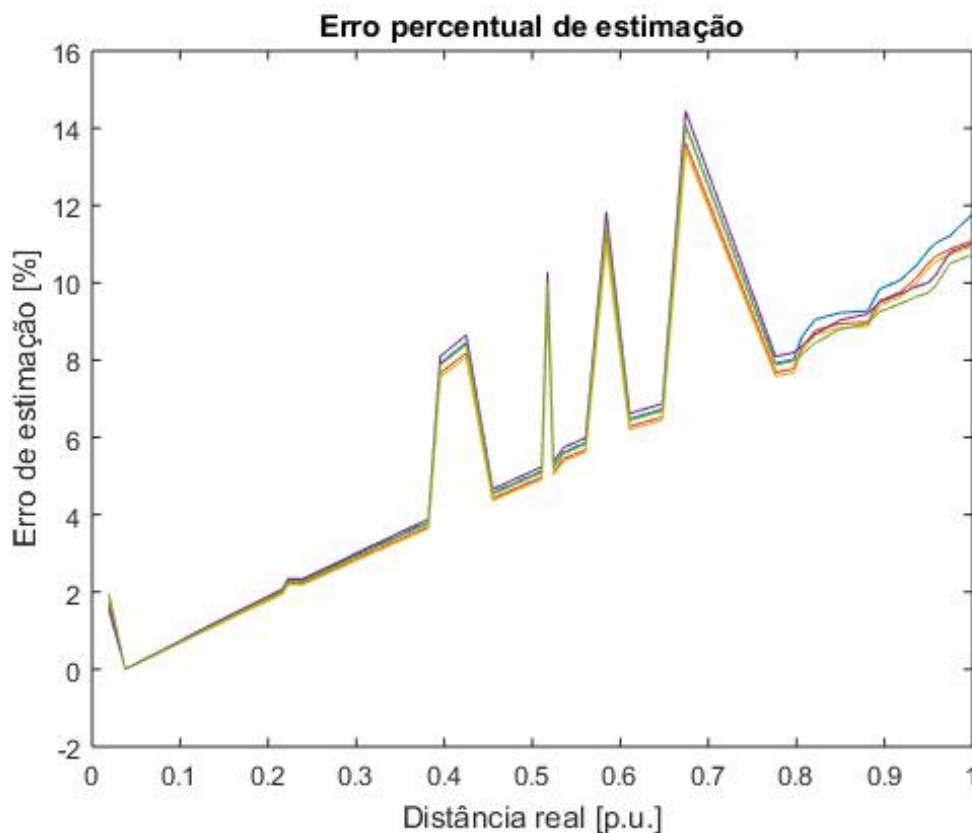
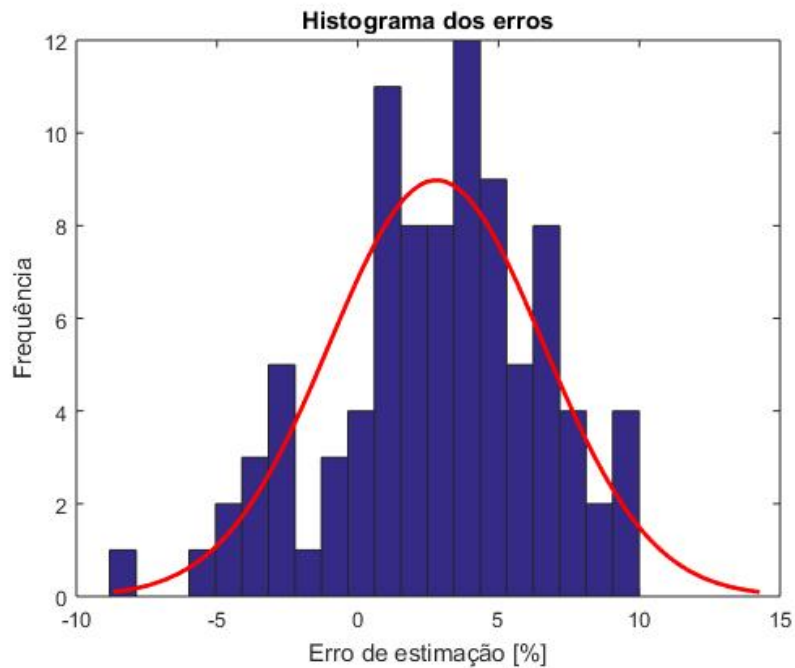


Figura 4.2: Comportamento do erro percentual de estimação para o método adaptado

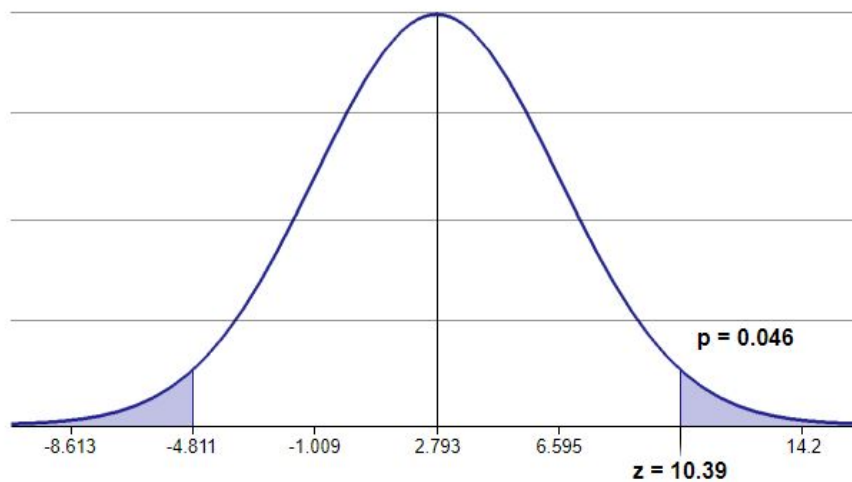
É possível observar da Figura 4.2 que o erro percentual de estimação é consideravelmente inferior ao erro de estimação dos métodos comuns apresentado na Figura 4.1, mantendo-se na ordem de 10% nos pontos mais distantes do alimentador. Estes resultado mostra que o desempenho do método adaptado é superior ao método tradicional de aplicação de algoritmos de localização de faltas em alimentadores de distribuição.

É realizada, a seguir, uma análise dos erros de estimação para cada segmento do alimentador, a fim de encontrar uma faixa de erro típica a ser utilizada nas análises seguintes. Conforme procedimento detalhado no Capítulo 3, o intervalo de erro típico é dado pelos valores de média e variância encontradas por meio do ajuste da curva Normal ao histograma dos erros médios. A Figura 4.3 apresenta graficamente o resultado desta análise para faltas monofásicas com resistência nula.

A curva Normal ajustada para os erros encontrados neste teste possui os seguintes parâmetros:  $\mu = 2,79281$  e  $\sigma^2 = 3,80181$ , dados em valores percentuais. A probabilidade de que o erro esteja no intervalo  $[-0,0481, 0,1039]$  p.u., referente a quatro desvios-padrão, é de 95,44%, conforme apresentado na Figura 4.4. Nesta Figura, os valores apresentados no eixo  $x$  do gráfico são dados



em %.



Foi realizada a mesma análise para cada tipo de falta simulado. Em todas os tipos de curto-circuito, foram realizados testes com 170 amostras, isto é, foram simulados defeitos em 170 vãos do alimentador, resultando 170 estimativas de locais de falta para cada um dos segmentos. A Tabela 4.2 apresenta as faixas de erros típicas para cada tipo de curto-circuito obtidas a partir da análise do histograma dos erros de estimação.

Todavia, durante a ocorrência de um defeito, não é possível distinguir, no primeiro momento, qual o tipo de falta, levando-se em consideração também casos de faltas de alta impedância, que

Tabela 4.2: Intervalos de erros para cada tipo de falta.

Tipo de defeito	Erro médio [%]	Desvio Padrão [%]	Intervalo [ <i>p.u.</i> ]
A-Terra; $R_F = 0$	2,79281	3,80181	[0,9519; 1,1039]
A-Terra; $R_F = 40\Omega$	2,99176	7,56584	[0,9543; 1,1558]
A-B	10,7885	9,7196	[0,9409; 1,1761]
A-B-C	4,2899	9,9440	[0,9435; 1,1423]

dificultam ainda mais a análise do circuito sob falta.

Para as análises seguintes, utiliza-se a maior faixa de erro apresentada na Tabela 4.2, como forma de garantir confiabilidade à estimativa realizada pelo método. Isto, é:

$$erro_t = [0,9408; 1,1761]p.u. \quad (4.1)$$

Este intervalo indica que o resultado da aplicação da metodologia está resguardado para erros de 5,92% para subestimação e erros de 17,6 % para superestimação do local da falta, em 95,44% dos casos.

Na Equação (4.1) o intervalo do erro foi deslocado para 1 *p.u.*. Esta será a forma na qual esta faixa será utilizada, pois é possível eliminar da estimativa os segmentos cujas extensões são inferiores à distância estimada para o defeito, levando-se em conta o intervalo de erro.

### 4.3 ESTUDOS DE CASO

As adaptações à aplicação do algoritmo propostas no Capítulo 3 são aplicadas nas seções seguintes mediante análise de casos de ocorrências reais no alimentador em estudo da CEB Distribuição.

#### 4.3.1 Caso 1: Ocorrência de cabo partido

Será analisada uma ocorrência de cabo partido ocorrida no ramal destacado em vermelho na Figura 4.5 por meio da aplicação dos passos da metodologia detalhados no Capítulo 3. Nesta figura também está representada a numeração de cada um dos segmentos em seus respectivos pontos terminais. No momento da ocorrência não se sabe o local nem a causa do defeito. A Tabela 4.3 apresenta informações sobre a ocorrência para fins de conferência dos dados.

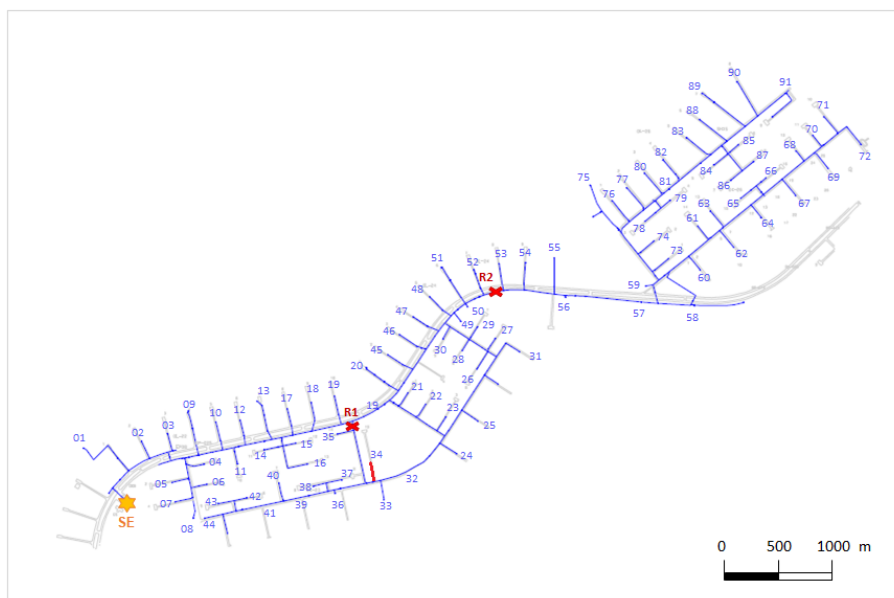


Figura 4.5: Local da ocorrência de cabo partido.

Tabela 4.3: Informações sobre a ocorrência de cabo partido.

<b>Data da ocorrência</b>	12/11/2017
<b>Consumidores atingidos</b>	31
<b>Duração</b>	1h38min
<b>Causa</b>	Cabo partido em rede aérea convencional
<b>Dispositivo de proteção atuado</b>	Chave fusível de ramal
<b>Quantidade de fases afetadas</b>	1
<b>Número do vão</b>	99
<b>Cabo</b>	4 AWG

No ATP, foi aplicada uma falta monofásica com  $R_F = 40 \Omega$  no local indicado na Figura 4.5 do circuito modelado de modo a reproduzir o defeito real ocorrido na rede. As informações foram tratadas adequadamente no programa para análises matemáticas de modo a obter trechos nos quais o defeito possa estar localizado, seguindo metodologia detalhada anteriormente.

O primeiro passo da metodologia trata-se da implementação do Método Takagi Simples com a finalidade de estimar o local da falta para cada um dos segmentos. O resultado da implementação do método encontra-se detalhado no Apêndice I.2. A Figura 4.6 apresenta este resultado graficamente, mostrando o local estimado pelo método para cada um dos segmentos. O trecho destacado nesta figura representa o local no qual a falta realmente está localizada.

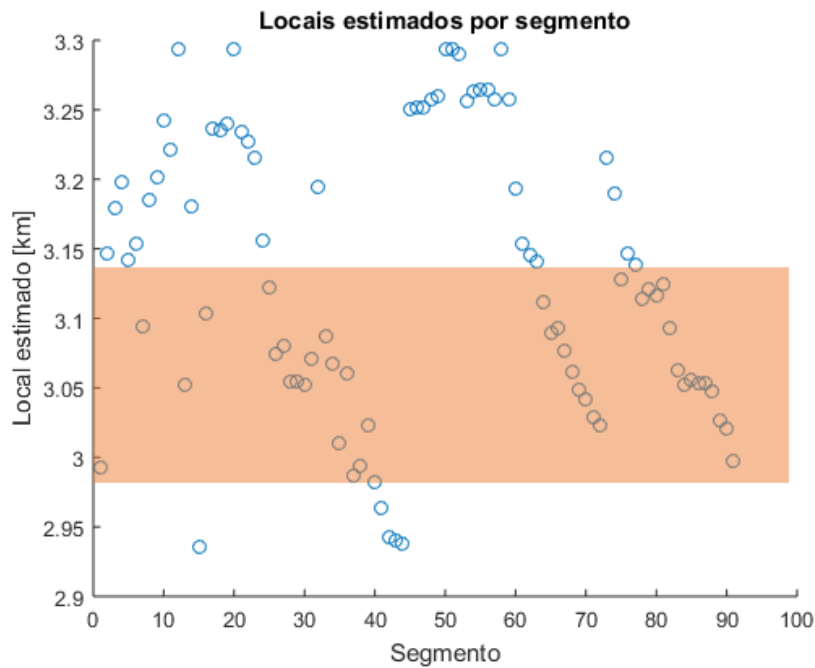


Figura 4.6: Pontos estimados por segmento para caso de cabo partido.

O ramal no qual o defeito foi simulado encontra-se no trecho entre 2,97 e 3,13 km de distância da subestação. O método de Takagi Simples estima que o defeito está localizado entre 2,93 e 3,29 km. Este resultado é um indicativo do funcionamento do algoritmo adaptado, uma vez que a posição real da falta está no intervalo estimado. O mesmo algoritmo estima pontos de defeito e todos os segmentos, mas em alguns casos essas estimativas são inválidas, pois localizam um defeito além da extensão do segmento.

Aplicando o intervalo de erro no trecho estimado, tem-se que o defeito pode estar localizado entre 2,77 e 3,87 km. A Figura 4.7 mostra os trechos estimados para os locais do defeito com base no resultado do algoritmo.

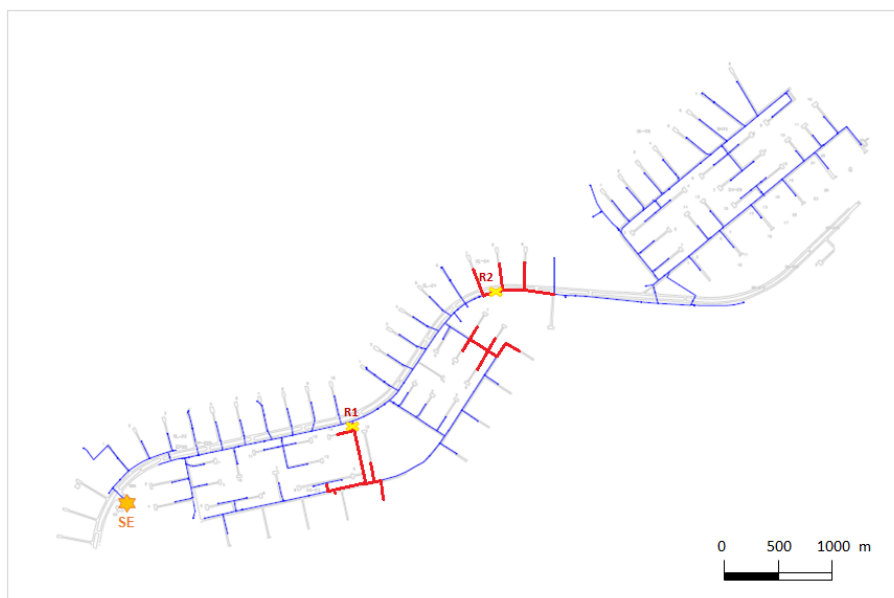


Figura 4.7: Trechos estimados pelo algoritmo

Da Figura 4.7, é possível verificar que a metodologia mapeou três trechos distintos no alimentador nos quais o defeito pode estar localizado e, que o local real da falta encontra-se mapeado entre os trechos possíveis. Além disso, há uma redução de 89,0% no campo de busca pelo defeito, calculado como sendo a razão entre o comprimento de todos os trechos estimados e o comprimento total da rede, que é de 25,04 km. Entretanto os locais mapeados encontram-se dispersos no alimentador. A fim de otimizar as buscas pelo defeito, buscam-se informações do histórico de eventos deste alimentador.

Parte-se, então, para a análise do histórico de eventos a fim subsidiar a tomada de decisão de onde a equipe de campo deve iniciar as buscas pelo defeito. O primeiro critério analisado é a atuação dos religadores do circuito, dado seu posicionamento. Nesta ocorrência, o religador *R1* não atua, pois o dispositivo de proteção mais a montante do defeito é a chave fusível do ramal. Esta atua de modo a isolar o defeito, entretanto o operador de mesa não possui esta informação até que a equipe de campo vá até o local.

É realizada, então, a análise de registros históricos de operação de chaves devido a cabos partidos por tipo de rede aérea. A Figura 4.8 apresenta o mapa de calor que indica os pontos das ocorrências de chaves operadas devido à rede aérea convencional, elaborado com auxílio da ferramenta de *Business Intelligence* e visualização de dados *Qlik Sense*. Este alimentador não apresenta histórico de eventos devido à rede compacta.

A Figura 4.8 indica os locais mais suscetíveis para ocorrência do defeito, indicados com cores quentes, baseado em histórico de eventos anteriores, registrados entre janeiro de 2017 e agosto de 2019. Indica-se, portanto, que sejam iniciadas as buscas por estes locais.

Na análise da ocorrência de cabo partido neste alimentador, é possível mostrar que a aplicação do algoritmo de localização de faltas adaptado, por si só é capaz de reduzir significativamente o



Figura 4.8: Locais de maior número de ocorrências de cabos partidos em rede convencional

campo de buscas pelo defeito, neste caso, em 89,0%. No contexto desta análise, a aplicação dos histórico de eventos foi relevante para tomada de decisão de onde iniciar as buscas pelo defeito, reduzindo, por sua vez, o tempo de atendimento da ocorrência. Neste caso, a implementação da metodologia proposta mostrou-se uma solução completa para o problema de localização de faltas, reduzindo tanto o problema das múltiplas estimações, quanto o tempo de restabelecimento do sistema.

#### 4.3.2 Caso 2: Ocorrência de causa não identificada

Os eventos de causa não identificada representaram 47,3% das causas de eventos ocorridos no circuito estudado entre janeiro de 2017 e agosto de 2019. Por este motivo é razoável analisar o desempenho da metodologia para ocorrências deste tipo. Será analisado um evento de causa desconhecida, localizado no trecho destacado na Figura 4.9, juntamente com a numeração de cada um dos segmentos em seus respectivos pontos terminais. A Tabela 4.4 apresenta informações sobre a ocorrência.

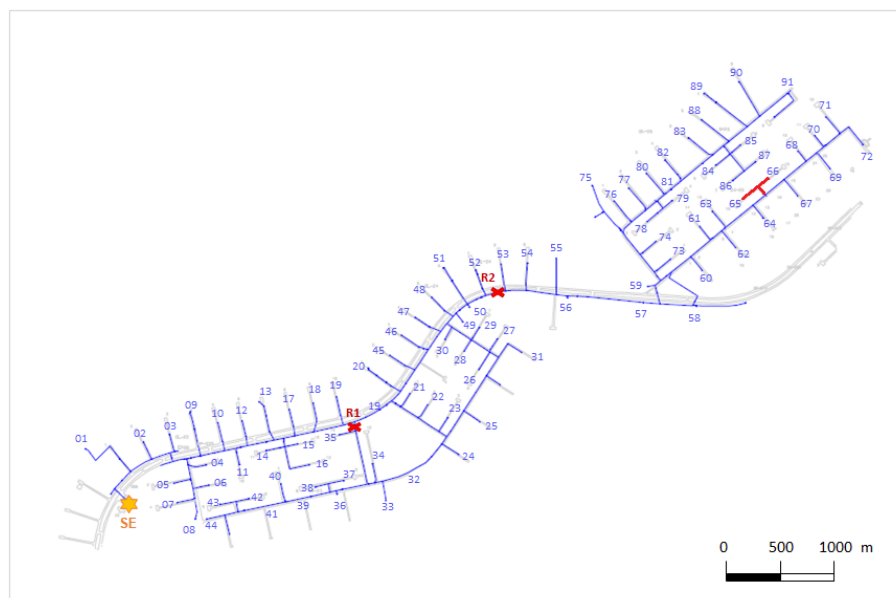


Figura 4.9: Local da ocorrência de causa não identificada.

Tabela 4.4: Informações sobre a ocorrência de causa não identificada

<b>Data da ocorrência</b>	14/06/2018
<b>Consumidores atingidos</b>	40
<b>Duração</b>	1h38min
<b>Causa</b>	Não identificada
<b>Dispositivo de proteção atuado</b>	Chave fusível de ramal
<b>Quantidade de fases afetadas</b>	2
<b>Número do vão</b>	146
<b>Cabo</b>	4 AWG

Para este teste, foi aplicado no modelo simulado no ATP uma falta bifásica no local indicado na Figura 4.9 do circuito modelado de modo a reproduzir o defeito real ocorrido na rede. A informação da quantidade de fases envolvidas neste defeito foi obtida por meio de análise oscilográfica do momento do defeito. A obtenção dos trechos nos quais o defeito possa estar localizado foi realizada seguindo metodologia detalhada anteriormente. O resultado da implementação do método Takagi Simples encontra-se no Apêndice I.3. A Figura 4.10 apresenta este resultado graficamente, mostrando o local estimado pelo método para cada um dos segmentos. O trecho destacado nesta figura representa o local no qual a falta realmente está localizada.

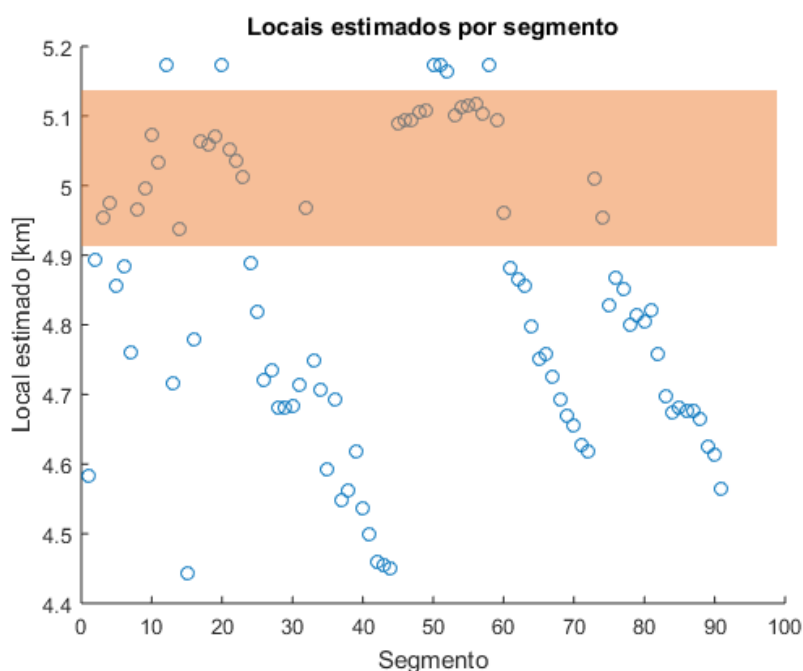


Figura 4.10: Pontos estimados por segmento para caso de cabo partido.

O trecho no qual o defeito foi simulado encontra-se entre 4,93 e 5,14 km de distância da subestação. O método de Takagi Simples estima que o defeito está localizado entre 4,44 e 5,17 km. Novamente, o trecho no qual a falta está localizada encontra-se mapeado no intervalo estimado. Ademais, nota-se da Figura 4.10 que a maior parte das estimativas neste caso foram subestimadas, mostrando que quanto mais distante do terminal de observação, maior a quantidade de estimativas



incorretas deste tipo. Este resultado já foi discutido anteriormente.

Aplicando o intervalo de erro no intervalo estimado, tem-se que o defeito pode estar localizado entre 4,177 e 6,080 km. A Figura 4.11 mostra os trechos estimados para os locais do defeito com base no resultado do algoritmo.

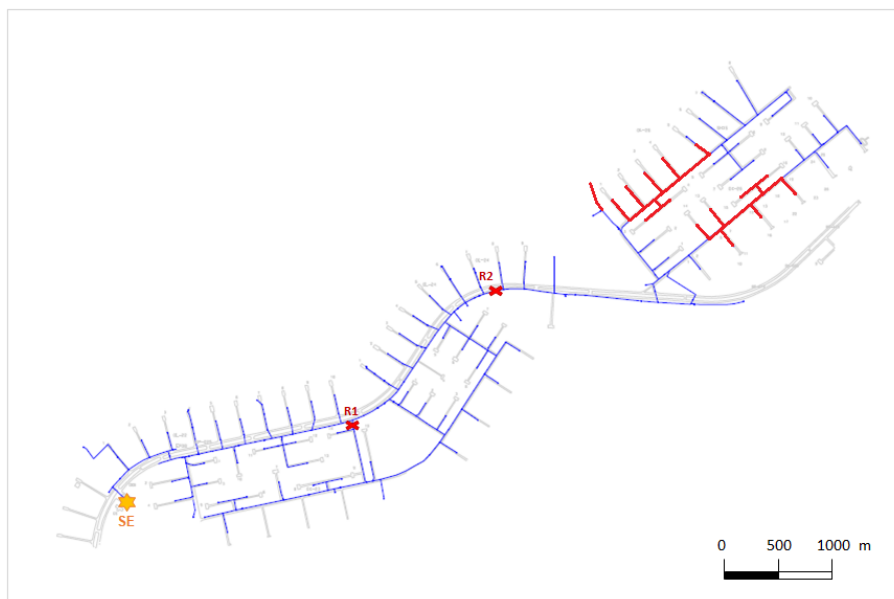


Figura 4.11: Trechos estimados pelo algoritmo

Como esperado e já demonstrado nos estudos de caso anteriores, nota-se da Figura 4.11 que o local real da falta encontra-se mapeado entre os trechos possíveis. Neste caso, há uma redução de 86,3% no campo de buscas pelo defeito.

O critério a ser analisado será o registro histórico de eventos, uma vez que nenhum religador instalado no circuito atuou nesta falta. A Figura 4.12 apresenta o mapa de calor elaborado com auxílio do *Qlik Sense* que indica os defeitos de causa não identificada neste circuito entre janeiro de 2017 e agosto de 2019.

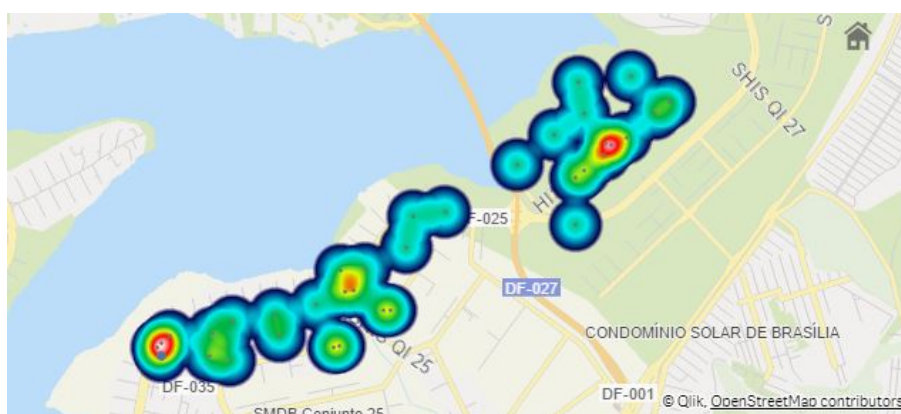


Figura 4.12: Locais com maior número de ocorrências de causa não identificada

A Figura 4.12 apresenta registros muito dispersos a respeito das ocorrências não identificadas.

Todavia ainda é possível identificar trechos com maior quantidade de ocorrências deste tipo de defeito que podem indicar a direção da falta. Defeitos de origem não identificada podem estar relacionados entre si, ocasionando ocorrências recorrentes.

Ademais, esta informação dispersa indica que existe a possibilidade de problemas no cadastro de ocorrências, uma vez que observa-se excesso de registros de defeitos não identificados. Isso mostra que, uma base de dados de eventos confiável implica tomadas de decisão mais precisas relacionadas à busca por defeitos na rede.

#### **4.4 CONCLUSÕES SOBRE A APLICAÇÃO DA METODOLOGIA**

Os estudos de caso realizados na seção anterior foram relevantes para verificar a eficácia da metodologia proposta. A seguir são discutidas questões sobre a eficácia do método.

Uma das etapas dos testes realizados foi a definição de um intervalo de erro que pudesse selecionar com boa confiabilidade os trechos nos quais há grandes chances de que o defeito esteja localizado. Ainda que o segmento possua comprimento menor do que a distância estimada para o ponto do defeito, o algoritmo entrega uma estimativa que, ao ser convertida em distância, possui precisão razoável. Estes resultados encontram-se apresentados nos Apêndices I.2 e I.3 para os estudos de caso realizados.

Ademais, quanto maior a distância entre a subestação e a falta, menor a quantidade de segmentos que são considerados na localização do defeito. Isso por que, quanto mais próximo à subestação, maior a quantidade de segmentos que possuem comprimento suficiente. Entretanto, não existem diferenças significativas no que diz respeito à redução no campo de buscas pelo defeito, que se mantém acima de 85% em todos os casos estudados.

Algumas considerações podem ser realizadas para a aplicação desta metodologia em alimentadores com características distintas do que foi estudado. Quanto maior a quantidade de ramificações com comprimentos suficientes no circuito, maior a quantidade de trechos distintos que são estimados. Isso pode tornar-se um problema em circuitos cuja topologia apresenta diversas ramificações ou que estão localizados em regiões de característica rural ou de difícil acesso. Em casos deste tipo, a proposta de análise de histórico de eventos pode ser bastante eficaz na tomada de decisão de onde iniciar as buscas pelo defeito, a fim de poupar recursos e tempo.

# 5 CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foi proposta uma metodologia de localização de faltas baseada em componentes de frequência fundamental adaptada para alimentadores radiais primários de redes aéreas de distribuição, com aplicação direta em um alimentador da CEB Distribuição.

Foram apresentados conceitos relativos à localização de faltas utilizando componentes de frequência fundamental e demonstrados algoritmos de localização de faltas amplamente difundidos na literatura. A metodologia proposta foi detalhada, especificando-se cada passo das adaptações nos métodos tradicionais em busca melhorar sua performance. Por fim, foi detalhada também uma maneira de reduzir o efeito das múltiplas estimações no método adaptado, facilitando a busca pelo defeito na rede e reduzindo o tempo no qual o sistema fica indisponível em decorrência de uma falta.

Em seguida, foram apresentados resultados de simulações computacionais e análises destes resultados, organizados de acordo com cada passo da metodologia empregada. Foram, também, realizados estudos de caso de modo a verificar a funcionalidade da metodologia proposta na localização de defeitos reais, reproduzidos no ATP.

Realizou-se testes comparativos entre os métodos de localização de faltas apresentados e verificou-se a performance de cada um deles de modo a escolher o que apresenta melhor precisão na localização de falta.

Foi possível, portanto, constatar que a adaptação proposta, que leva em conta a aplicação de um método preciso de localização de faltas previamente testado em um sistema radial segregado em segmentos, definidos como trechos entre a subestação de distribuição e cada transformador do circuito, apresenta precisão superior aos métodos de localização de faltas comuns aplicados diretamente em alimentadores de distribuição.

A metodologia proposta apresenta redução de pelo menos 85% no campo de buscas por um defeito cuja localização é desconhecida, demonstrando a eficácia da metodologia proposta, o que a torna uma ferramenta de grande potencial na busca por maior qualidade no fornecimento de energia elétrica.

Ademais, a metodologia mostra-se completa em alguns casos, entregando como produto não somente uma estimativa para o trecho no qual o defeito possa estar localizado, com precisão superior a 95%, mas também uma alternativa para a redução do problema das múltiplas estimações. Tal desafio, que é característico das metodologias de localização de faltas baseadas em componentes de frequência fundamental e é amplamente mencionado na bibliografia, ainda não possui solução definitiva.

Como continuação dos estudos realizados neste trabalho, são sugeridas as seguintes propostas

para trabalhos futuros:

- Avaliação da influência das variações de carga no circuito na precisão da metodologia proposta;
- Estudo da funcionalidade do método proposto em alimentadores primários com características distintas do que foi estudado;
- Avaliação do impacto da inserção de geração distribuída na precisão da estimativa do local da falta do método proposto;
- Utilização de inteligência artificial como forma de identificar padrões e auxiliar na tomada de decisões de modo a mitigar o problema das múltiplas estimações.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ZIMMERMAN, K.; COSTELLO, D. Impedance-based fault location experience. In: IEEE. *2006 IEEE Rural Electric Power Conference*. [S.l.], 2006. p. 1–16.
- 2 GARCIA, C. P.; ALVES, M. F. Dimensionamento de compensadores série considerando a frequência de ocorrência dos afundamentos. *Anais do IX CBQEE*, p. 255–259, 2011.
- 3 FARHANGI, H. The path of the smart grid. *IEEE power and energy magazine*, IEEE, v. 8, n. 1, p. 18–28, 2009.
- 4 MAIA, F. Redes elétricas inteligentes no brasil: Subsídio para um plano nacional de implantação. *Synergia*, p. 180–275, 2013.
- 5 ANEEL. *Redes subterrâneas de distribuição de energia: situação atual e avaliação da necessidade de aprimoramento da regulação associada*. [S.l.], 2014.
- 6 SALIM, R. H. Novos desenvolvimentos na localização de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica fundamentada na impedância. 2008.
- 7 PRODIST, A. *Agência Nacional de Energia Elétrica-Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8–Qualidade da Energia Elétrica*. [S.l.]: Revisão, 2018.
- 8 SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J. J.; ROSOŁOWSKI, E. *Fault location on power networks*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2009.
- 9 LOPES, F. V.; JR, D. F.; NEVES, W. L. Localização de faltas em linhas de transmissão: Revisão da literatura e tendências recentes. 2014.
- 10 RECHE, E. A. *Metodologia baseada em mineração de dados para redução de múltipla estimação na localização de faltas em alimentadores de distribuição radiais*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2018.
- 11 DAS, S.; SANTOSO, S.; GAIKWAD, A.; PATEL, M. Impedance-based fault location in transmission networks: theory and application. *IEEE Access*, IEEE, v. 2, p. 537–557, 2014.
- 12 KRISHNATHEVAR, R.; NGU, E. E. Generalized impedance-based fault location for distribution systems. *IEEE transactions on power delivery*, IEEE, v. 27, n. 1, p. 449–451, 2011.
- 13 MORALES-ESPAÑA, G.; MORA-FLÓREZ, J.; VARGAS-TORRES, H. Elimination of multiple estimation for fault location in radial power systems by using fundamental single-end measurements. *IEEE Transactions on power delivery*, IEEE, v. 24, n. 3, p. 1382–1389, 2009.
- 14 ATPDRAW. *Atpdraw version 6.3 user manual*. Norwegian Electric Power Research Institute, Trondheim, Norway, 2018.
- 15 MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. *Estatística básica*. [S.l.]: Editora Saraiva, 2017.
- 16 ANDRADE, V. D.; SORRENTINO, E. Typical expected values of the fault resistance in power systems. In: IEEE. *2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA)*. [S.l.], 2010. p. 602–609.

## I.1 INFORMAÇÕES SOBRE O ALIMENTADOR MODELADO

Tabela 1: Características dos vãos

Vão	Comprimento do vão [km]	Cabo	Tipo de rede aérea
1	0,0951	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
2	0,0936	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
3	0,1486	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
4	0,1053	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
5	0,0429	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
6	0,1185	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
7	0,1178	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
8	0,1374	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
9	0,0842	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
10	0,0657	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
11	0,1152	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
12	0,0320	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
13	0,0870	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
14	0,0680	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
15	0,1350	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
16	0,1650	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
17	0,2770	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
18	0,0647	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
19	0,0670	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
20	0,1480	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
21	0,1500	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
22	0,1400	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
23	0,1390	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
24	0,0326	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
25	0,0333	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
26	0,0596	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
27	0,1230	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
28	0,1180	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
29	0,1320	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
30	0,1865	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
31	0,1310	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta

Continua na próxima página

**Tabela 1 – Continuação da página anterior**

<b>Vão</b>	<b>Comprimento do vão [km]</b>	<b>Cabo</b>	<b>Tipo de rede aérea</b>
32	0,5120	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
33	0,1026	4 AWG	Rede Convencional
34	0,0582	4 AWG	Rede Convencional
35	0,0470	4 AWG	Rede Convencional
36	0,2330	4 AWG	Rede Convencional
37	0,1800	4 AWG	Rede Convencional
38	0,0700	4 AWG	Rede Convencional
39	0,0200	4 AWG	Rede Convencional
40	0,2310	4 AWG	Rede Convencional
41	0,0970	4 AWG	Rede Convencional
42	0,1520	4 AWG	Rede Convencional
43	0,1710	4 AWG	Rede Convencional
44	0,0800	4 AWG	Rede Convencional
45	0,0820	4 AWG	Rede Convencional
46	0,0990	4 AWG	Rede Convencional
47	0,1950	4 AWG	Rede Convencional
48	0,0750	4 AWG	Rede Convencional
49	0,1390	4 AWG	Rede Convencional
50	0,1600	4 AWG	Rede Convencional
51	0,0190	4 AWG	Rede Convencional
52	0,3390	4 AWG	Rede Convencional
53	0,0660	4 AWG	Rede Convencional
54	0,1190	4 AWG	Rede Convencional
55	0,0870	4 AWG	Rede Convencional
56	0,0720	4 AWG	Rede Convencional
57	0,0420	4 AWG	Rede Convencional
58	0,0810	4 AWG	Rede Convencional
59	0,2370	4 AWG	Rede Convencional
60	0,0960	4 AWG	Rede Convencional
61	0,0340	4 AWG	Rede Convencional
62	0,1410	4 AWG	Rede Convencional
63	0,1250	4 AWG	Rede Convencional
64	0,4230	4 AWG	Rede Convencional
65	0,0094	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
66	0,0450	4/0 AWG	Rede Convencional
67	0,0774	4/0 AWG	Rede Convencional
68	0,0562	4/0 AWG	Rede Convencional
69	0,1761	4 AWG	Rede Convencional

Continua na próxima página

**Tabela 1 – Continuação da página anterior**

<b>Vão</b>	<b>Comprimento do vão [km]</b>	<b>Cabo</b>	<b>Tipo de rede aérea</b>
70	0,1284	50 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
70	0,0459	1/0 AWG	Rede Convencional
71	0,0766	2 AWG	Rede Convencional
72	0,1145	4 AWG	Rede Convencional
72	0,0200	4 AWG	Rede Convencional
73	0,1294	50 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
73	0,0986	4 AWG	Rede Convencional
74	0,1335	50 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
75	0,1736	50 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
76	0,1709	50 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
77	0,0946	50 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
78	0,1505	50 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
79	0,9000	50 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
80	0,0960	50 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
81	0,0590	4 AWG	Rede Convencional
82	0,1110	4 AWG	Rede Convencional
83	0,8330	4 AWG	Rede Convencional
84	0,2660	4 AWG	Rede Convencional
85	0,1500	50 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
86	0,1710	50 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
87	0,1710	50 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
88	0,0754	50 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
89	0,1120	185 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
90	0,0970	4 AWG	Rede Convencional
91	0,1120	4/0 AWG	Rede Convencional
92	0,1040	4 AWG	Rede Convencional
93	0,1690	4/0 AWG	Rede Convencional
94	0,1160	4 AWG	Rede Convencional
95	0,0520	4/0 AWG	Rede Convencional
96	0,0530	4 AWG	Rede Convencional
97	0,4420	4 AWG	Rede Convencional
98	0,0410	4 AWG	Rede Convencional
99	0,1690	4 AWG	Rede Convencional
100	0,0500	4 AWG	Rede Convencional
101	0,4470	4 AWG	Rede Convencional
102	0,1550	4 AWG	Rede Convencional
103	0,0870	4 AWG	Rede Convencional
104	0,6000	2 AWG	Rede Convencional

Continua na próxima página



**Tabela 1 – Continuação da página anterior**

<b>Vão</b>	<b>Comprimento do vão [km]</b>	<b>Cabo</b>	<b>Tipo de rede aérea</b>
105	0,0940	4 AWG	Rede Convencional
106	0,0810	2 AWG	Rede Convencional
107	0,1220	4 AWG	Rede Convencional
108	0,1590	4 AWG	Rede Convencional
109	0,1190	4 AWG	Rede Convencional
110	0,2690	4 AWG	Rede Convencional
111	0,0290	4 AWG	Rede Convencional
112	0,0690	4 AWG	Rede Convencional
113	0,0770	4 AWG	Rede Convencional
114	0,0970	4 AWG	Rede Convencional
115	0,1910	4 AWG	Rede Convencional
116	0,1880	4 AWG	Rede Convencional
117	0,1250	4 AWG	Rede Convencional
118	0,1480	4 AWG	Rede Convencional
119	0,1130	4 AWG	Rede Convencional
120	0,1480	4 AWG	Rede Convencional
121	0,0620	4 AWG	Rede Convencional
122	0,1240	4 AWG	Rede Convencional
123	0,0910	4 AWG	Rede Convencional
124	0,1380	4 AWG	Rede Convencional
125	0,0890	4 AWG	Rede Convencional
126	0,0900	4 AWG	Rede Convencional
127	0,2310	50 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
128	0,0960	50 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
129	0,0740	50 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
130	0,1750	50 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
131	0,0240	50 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
132	0,1660	50 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
133	0,1680	50 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
134	0,1690	50 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
135	0,1010	50 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
136	0,1010	50 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
137	0,0200	50 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
138	0,1698	50 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
139	0,1670	50 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
140	0,1690	50 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
141	0,2310	50 mm <sup>2</sup>	Rede Compacta
142	0,0982	4 AWG	Rede Convencional

Continua na próxima página

**Tabela 1 – Continuação da página anterior**

<b>Vão</b>	<b>Comprimento do vão [km]</b>	<b>Cabo</b>	<b>Tipo de rede aérea</b>
143	0,1260	4 AWG	Rede Convencional
144	0,1400	4 AWG	Rede Convencional
145	0,1060	4 AWG	Rede Convencional
146	0,0700	4 AWG	Rede Convencional
147	0,1110	4 AWG	Rede Convencional
148	0,0840	4 AWG	Rede Convencional
149	0,1270	4 AWG	Rede Convencional
150	0,0975	4 AWG	Rede Convencional
151	0,1040	4 AWG	Rede Convencional
152	0,1390	4 AWG	Rede Convencional
153	0,1360	4 AWG	Rede Convencional
154	0,1350	4 AWG	Rede Convencional
155	0,1650	4 AWG	Rede Convencional
156	0,1680	2 AWG	Rede Convencional
157	0,0620	4 AWG	Rede Convencional
158	0,1180	4 AWG	Rede Convencional
159	0,0740	4 AWG	Rede Convencional
160	0,1680	2 AWG	Rede Convencional
161	0,0480	2 AWG	Rede Convencional
162	0,1190	4 AWG	Rede Convencional
163	0,0620	2 AWG	Rede Convencional
164	0,1190	4 AWG	Rede Convencional
165	0,0660	2 AWG	Rede Convencional
166	0,1230	4 AWG	Rede Convencional
167	0,0910	4 AWG	Rede Convencional
168	0,1370	2 AWG	Rede Convencional
169	0,0870	2 AWG	Rede Convencional
170	0,0870	2 AWG	Rede Convencional

## I.2 RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO 1

Tabela 2: Resultado da aplicação do algoritmo para caso de cabo partido.

Segmento	Comprimento do segmento [km]	$m$ estimado [p.u.]	Distância estimada [km]
1	0,414	7,2357	2,993
2	0,467	6,7429	3,147
3	0,619	5,1347	3,179
4	0,738	4,3334	3,198
5	0,807	3,8911	3,142
6	0,848	3,7214	3,154
7	0,925	3,3446	3,094
8	0,853	3,7355	3,185
9	0,987	3,2421	3,201
10	0,995	3,2580	3,242
11	1,117	2,8842	3,221
12	1,081	3,0458	3,294
13	2,109	1,4467	3,052
14	1,370	2,3209	3,181
15	2,092	1,4026	2,935
16	1,525	2,0349	3,104
17	1,418	2,2817	3,236
18	1,574	2,0546	3,235
19	1,739	1,8629	3,240
20	1,845	1,7849	3,294
21	2,195	1,4738	3,234
22	2,314	1,3946	3,227
23	2,495	1,2892	3,216
24	2,744	1,1504	3,156
25	2,880	1,0842	3,122
26	3,101	0,9913	3,074
27	3,068	1,0042	3,080
28	3,204	0,9533	3,054
29	3,205	0,9530	3,054
30	3,346	0,9123	3,052
31	3,117	0,9852	3,071
32	2,612	1,2230	3,194
33	3,034	1,0178	3,087
34	3,136	0,9781	3,067
35	3,464	0,8691	3,010

Continua na próxima página

**Tabela 2 – Continuação da página anterior**

<b>Segmento</b>	<b>Comprimento do segmento [km]</b>	<b><i>m</i> estimado [<i>p.u.</i>]</b>	<b>Distância estimada [km]</b>
36	3,172	0,9648	3,060
37	3,953	0,7556	2,987
38	3,940	0,7600	2,994
39	3,381	0,8943	3,023
40	3,659	0,8152	2,982
41	3,809	0,7780	2,963
42	3,984	0,7387	2,943
43	4,004	0,7345	2,940
44	4,029	0,7292	2,938
45	2,147	1,5140	3,251
46	2,300	1,4140	3,252
47	2,465	1,3191	3,252
48	2,583	1,2614	3,258
49	2,723	1,1971	3,260
50	2,587	1,2734	3,294
51	2,620	1,2572	3,294
52	2,700	1,2186	3,290
53	2,882	1,1298	3,256
54	2,972	1,0976	3,263
55	3,088	1,0572	3,264
56	3,222	1,0135	3,265
57	3,470	0,9387	3,257
58	3,370	0,9774	3,294
59	4,043	0,8055	3,257
60	4,363	0,7318	3,193
61	4,592	0,6869	3,154
62	4,641	0,6780	3,146
63	4,675	0,6719	3,141
64	4,872	0,6389	3,112
65	5,044	0,6126	3,090
66	5,017	0,6166	3,093
67	5,142	0,5985	3,077
68	5,283	0,5794	3,061
69	5,392	0,5655	3,049
70	5,452	0,5581	3,042
71	5,586	0,5422	3,029
72	5,642	0,5359	3,023
73	4,243	0,7579	3,215

Continua na próxima página

**Tabela 2 – Continuação da página anterior**

<b>Segmento</b>	<b>Comprimento do segmento [km]</b>	<b><i>m</i> estimado [<i>p.u.</i>]</b>	<b>Distância estimada [km]</b>
74	4,381	0,7281	3,190
75	4,764	0,6566	3,128
76	4,637	0,6787	3,147
77	4,759	0,6596	3,139
78	4,858	0,6411	3,114
79	4,814	0,6483	3,121
80	4,918	0,6337	3,116
81	4,792	0,6519	3,124
82	5,040	0,6137	3,093
83	5,291	0,5790	3,063
84	5,395	0,5657	3,052
85	5,363	0,5698	3,056
86	5,496	0,5555	3,053
87	5,496	0,5555	3,053
88	5,455	0,5586	3,047
89	5,727	0,5285	3,027
90	5,749	0,5255	3,021
91	5,929	0,5055	2,997

### I.3 RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO 2

Tabela 3: Resultado da aplicação do algoritmo para caso de defeito com causa não identificada.

Segmento	Comprimento do segmento [km]	$m$ estimado [ <i>p.u.</i> ]	Distância estimada [km]
1	0,414	11,0832	4,584
2	0,467	10,4857	4,894
3	0,619	8,0017	4,954
4	0,738	6,7409	4,975
5	0,807	6,0151	4,856
6	0,848	5,7604	4,883
7	0,925	5,1451	4,760
8	0,853	5,8238	4,965
9	0,987	5,0599	4,995
10	0,995	5,0990	5,074
11	1,117	4,5074	5,034
12	1,081	4,7836	5,173
13	2,109	2,2354	4,715
14	1,370	3,6024	4,937
15	2,092	2,1230	4,442
16	1,525	3,1337	4,780
17	1,418	3,5695	5,063
18	1,574	3,2140	5,060
19	1,739	2,9152	5,071
20	1,845	2,8032	5,173
21	2,195	2,3018	5,051
22	2,314	2,1764	5,035
23	2,495	2,0096	5,013
24	2,744	1,7821	4,889
25	2,880	1,6734	4,819
26	3,101	1,5225	4,721
27	3,068	1,5433	4,734
28	3,204	1,4612	4,681
29	3,205	1,4606	4,680
30	3,346	1,3998	4,683
31	3,117	1,5127	4,714
32	2,612	1,9019	4,967
33	3,034	1,5653	4,748
34	3,136	1,5011	4,707
35	3,464	1,3262	4,593

Continua na próxima página

**Tabela 3 – Continuação da página anterior**

<b>Segmento</b>	<b>Comprimento do segmento [km]</b>	<b><i>m</i> estimado [p.u.]</b>	<b>Distância estimada [km]</b>
36	3,172	1,4797	4,693
37	3,953	1,1506	4,548
38	3,940	1,1581	4,562
39	3,381	1,3665	4,619
40	3,659	1,2402	4,537
41	3,809	1,1814	4,499
42	3,984	1,1194	4,459
43	4,004	1,1127	4,455
44	4,029	1,1045	4,449
45	2,147	2,3708	5,090
46	2,300	2,2145	5,094
47	2,465	2,0658	5,093
48	2,583	1,9763	5,105
49	2,723	1,8758	5,108
50	2,587	1,9999	5,173
51	2,620	1,9745	5,173
52	2,700	1,9133	5,165
53	2,882	1,7697	5,100
54	2,972	1,7202	5,113
55	3,088	1,6570	5,116
56	3,222	1,5886	5,118
57	3,470	1,4707	5,103
58	3,370	1,5350	5,173
59	4,043	1,2602	5,095
60	4,363	1,1373	4,962
61	4,592	1,0632	4,882
62	4,641	1,0486	4,866
63	4,675	1,0387	4,855
64	4,872	0,9847	4,797
65	5,044	0,9419	4,751
66	5,017	0,9484	4,758
67	5,142	0,9192	4,726
68	5,283	0,8882	4,693
69	5,392	0,8659	4,669
70	5,452	0,8540	4,656
71	5,586	0,8286	4,628
72	5,642	0,8184	4,617
73	4,243	1,1806	5,009

Continua na próxima página

**Tabela 3 – Continuação da página anterior**

<b>Segmento</b>	<b>Comprimento do segmento [km]</b>	<b><i>m</i> estimado [p.u.]</b>	<b>Distância estimada [km]</b>
74	4,381	1,1312	4,955
75	4,764	1,0136	4,828
76	4,637	1,0498	4,867
77	4,759	1,0195	4,852
78	4,858	0,9883	4,801
79	4,814	1,0000	4,814
80	4,918	0,9771	4,805
81	4,792	1,0059	4,820
82	5,040	0,9440	4,758
83	5,291	0,8880	4,698
84	5,395	0,8666	4,675
85	5,363	0,8731	4,682
86	5,496	0,8510	4,677
87	5,496	0,8510	4,677
88	5,455	0,8552	4,665
89	5,727	0,8078	4,626
90	5,749	0,8025	4,613
91	5,929	0,7700	4,565