

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Patrick Escalante Farias

**MÉTODO PARA ESTIMAÇÃO DA DISTÂNCIA DE FALTAS DE ALTA  
IMPEDÂNCIA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA  
ELÉTRICA CONSIDERANDO DIFERENTES TIPOS DE SOLO**

Santa Maria, RS  
2017



**Patrick Escalante Farias**

**MÉTODO PARA ESTIMAÇÃO DA DISTÂNCIA DE FALTAS DE ALTA  
IMPEDÂNCIA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA  
CONSIDERANDO DIFERENTES TIPOS DE SOLO**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Engenharia Elétrica.**

Orientador: Ghendy Cardoso Jr., Dr. Eng.  
Coorientador: Adriano Peres de Moraes, Dr. Eng.

Santa Maria, RS, Brasil  
2017

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Farias, Patrick Escalante

Método para Estimação da Distância de Faltas de Alta Impedância em Redes de Distribuição de Energia Elétrica Considerando Diferentes Tipos de Solos / Patrick Escalante Farias.- 2017.

122 p.; 30 cm

Orientador: Ghendy Cardoso Junior

Coorientador: Adriano Peres de Moraes

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2017

1. Localização de faltas 2. Curtos-circuitos 3. Alta Impedância de falta 4. Redes Neurais 5. Treinamento contínuo I. Cardoso Junior, Ghendy II. Peres de Moraes, Adriano III. Título.

---

© 2017

Todos os direitos autorais reservados a Patrick Escalante Farias. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Rua Lupicínio Rodrigues, n. 125, Balneário Parque Pinhal, Itaara, RS. CEP: 97185-000

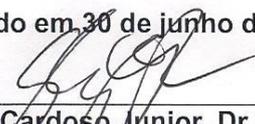
Fone (0xx) 54 999599115; E-mail: pefarias@gmail.com

Patrick Escalante Farias

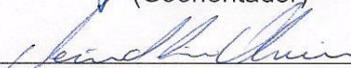
**MÉTODO PARA ESTIMAÇÃO DA DISTÂNCIA DE FALTAS DE ALTA  
IMPEDÂNCIA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA  
CONSIDERANDO DIFERENTES TIPOS DE SOLO**

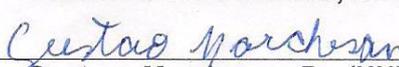
Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Doutor em Engenharia Elétrica.**

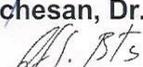
Aprovado em 30 de junho de 2017:

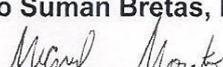
  
\_\_\_\_\_  
**Ghendy Cardoso Junior, Dr. (UFSM)**  
(Presidente/Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
**Adriano Peres de Moraes, Dr. (UFSM)**  
(Coorientador)

  
\_\_\_\_\_  
**Aécio de Lima Oliveira, Dr. (UFSM)**

  
\_\_\_\_\_  
**Gustavo Marchesan, Dr. (UNIPAMPA)**

  
\_\_\_\_\_  
**Arturo Suman Bretas, Dr. (UF)**

  
\_\_\_\_\_  
**Miguel Moreto, Dr. (UFSC)**

Santa Maria, RS  
2017



## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer aos meus pais, Antônio e Ivete, que não mediram esforços para me proporcionar as melhores condições de ensino, educação e que nunca desistiram da minha formação. Minha irmã, Sayonara, que, assim como meus pais, participou de todos meus momentos escolares, mesmo naqueles mais embaraçosos. Meus familiares, avós, tios e primos, que sempre demonstraram apoio e orgulho em cada conquista obtida.

Minha namorada, Sara, por estar presente no período mais árduo da elaboração dessa tese e por suportar todo estresse desse momento. Sua paciência, apoio e tranquilidade transmitida foram de extrema importância para que esse momento fosse alcançado.

Meus orientadores, professores Ghendy e Adriano, pelos dez anos de convívio, os quais foram de grande importância para minha vida acadêmica e profissional. A atuação profissional de vocês é referência para construção da minha trajetória como docente e pesquisador.

Por fim, mas não menos importante, a todos os colegas e amigos do CEESP, por sempre estarem dispostos a auxiliar no desenvolvimento dessa tese. Além disso, gostaria de agradecer pelos inúmeros momentos de descontração, sem os quais a elaboração dessa tese seria ainda mais árdua.



*Quanto mais aumenta nosso  
conhecimento, mais evidente  
fica nossa ignorância.*

(John F. Kennedy)



## RESUMO

### MÉTODO PARA ESTIMAÇÃO DA DISTÂNCIA DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA CONSIDERANDO DIFERENTES TIPOS DE SOLO

AUTOR: Patrick Escalante Farias  
ORIENTADOR: Ghendy Cardoso Júnior  
COORDENADOR: Adriano Peres de Moraes

Esse trabalho propõe uma metodologia, desenvolvida no domínio do tempo, para localização de faltas de alta impedância em sistemas aéreos de distribuição de energia elétrica. Um dos aspectos inovadores do método é a proposição de um único modelo matemático para representar as diferentes curvas  $V \times I$  geradas durante uma falta de alta impedância em diferentes tipos de solos. O comportamento do alimentador é equacionado em função da distância da falta, dos parâmetros da rede e das correntes e tensões medidas na subestação. Sendo assim, o método proposto não necessita da instalação de nenhum equipamento adicional de medição na rede. As capacitâncias do alimentador também foram consideradas no equacionamento da rede elétrica, tornando o modelo mais próximo de um alimentador real. Outro aspecto inovador é a utilização de uma rede neural artificial para estimação dos parâmetros desconhecidos das equações não lineares que modelam o comportamento do alimentador durante as faltas de alta impedância. Essa rede é treinada de forma contínua, e somente após o início da falta, através dos dados gerados pela própria falta. Dessa maneira, não é necessário simular diversos casos para o treinamento prévio da rede. O desempenho do método proposto foi avaliado no sistema teste IEEE 34 barras através da variação do tipo de solo, do ângulo de incidência das faltas e do carregamento do alimentador. Além disso, a influência da metodologia de estimação da corrente no ponto de falta também foi avaliada. Por fim, o desempenho do método proposto nesse trabalho foi comparado com outro recentemente apresentado na literatura. De modo geral, em 86% dos casos testados o algoritmo obteve um erro inferior a 2,5% na estimação da distância da falta, sendo que o erro máximo obtido foi de 4%. Na análise comparativa com outro método, o algoritmo proposto obteve melhores resultados em todos os casos testados, independentemente do tipo de solo em que a falta incidiu e da sua distância. Os bons resultados obtidos, aliado a simplicidade e baixo custo de implementação, tornam o método proposto nesse trabalho promissor para a aplicação em um alimentador real.

**Palavras-chave:** Localização de faltas. Curtos-circuitos. Alta impedância de falta. Redes neurais. Treinamento contínuo. Tensão no ponto de falta.



## ABSTRACT

### A DISTANCE ESTIMATION METHOD FOR HIGH IMPEDANCE FAULT IN DISTRIBUTION NETWORKS CONSIDERING DIFFERENT TYPES OF SOIL

AUTHOR: Patrick Escalante Farias  
ADVISOR: Ghendy Cardoso Júnior  
CO-ADVISOR: Adriano Peres de Morais

This work proposes a time-domain methodology to locate high impedance faults in overhead distribution systems. One of the innovative aspects of the method is the proposition of a single mathematical model to represent the different  $V \times I$  curves generated during a high impedance fault in different types of soils. The feeder behavior is modeled by the distance of the fault, the network parameters and the currents and voltages measured at the substation. Therefore, the proposed method does not require the installation of any additional measurement equipment in the network. The feeder capacitances were also considered in the system model, making it closer to a real feeder. Another innovative aspect is the use of an artificial neural network to estimate the unknown parameters of the nonlinear equations that model the feeder behavior during high impedance faults. This network is trained continuously, and only after the fault starts, through the data generated by the own fault. Thus, it is not necessary to simulate several cases for the previous training of the network. The performance of the proposed method was evaluated in IEEE 34 node test feeder through the variation of soil type, fault incidence angles and load feeder. Furthermore, the influence of the current estimation methodology on the fault point was also evaluated. Finally, the performance of the method proposed was compared with another article recently presented. In general, in 86% of the cases tested, the algorithm obtained an error less than 2.5% in the estimation of the fault distance, and the maximum error obtained was 4%. In the comparative analysis with the other method, the proposed algorithm obtained better results in all cases tested, regardless of the soil type in which the fault occurred and its distance. The good results obtained, combined with its simplicity and low cost of implementation, make the method proposed in this work promising for the application in a real feeder.

**Keywords:** Fault location. Short circuits. High impedance fault. Neural networks. Continuous training. Voltage at the Fault point.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Principais causas de faltas em redes de distribuição aéreas .....	33
Figura 2.2 - Oscilografia da corrente no condutor utilizado no ensaio da CESP .....	35
Figura 2.3 - Detalhe dos <i>shoulders</i> .....	35
Figura 2.4 - Experimento para caracterização de arco elétrico .....	36
Figura 2.5 - Formas de corrente e tensão de arco elétrico. a) Corrente de curto-circuito com amplitude elevada. b) Corrente de curto-circuito com amplitude reduzida. ....	37
Figura 2.6 - Estrutura utilizada nos ensaios .....	38
Figura 2.7 - Curvas $V \times I$ correspondente a um ciclo da FAI em cada tipo de superfície: a) areia, b) asfalto, c) cascalho, d) paralelepípedo, e) grama, f) solo local .....	38
Figura 2.8 - Modelo de FAI utilizando diodos e fonte CC .....	40
Figura 2.9 - Modelo de duas resistências variáveis controlada por MODELS.....	41
Figura 2.10 - Corrente no ponto de falta durante uma FAI em uma superfície de cascalho: a) detalhe etapa de <i>buildup</i> , b) detalhe assimetria.....	43
Figura 3.1 - Sistema monofásico com FAI no ponto F e modelo de linha $\pi$ .....	52
Figura 3.2 - Modelo proposto por Emanuel et al. (1990) para simulação de FAI .....	53
Figura 4.1 - Modelo para faltas de alta impedância.....	60
Figura 4.2 - Corrente na fase em falta. Detalhe dos pontos utilizados no critério de detecção do fim da etapa de <i>buildup</i> .....	62
Figura 4.3 - Curvas $V \times I$ no ponto de falta para diferentes solos e suas respectivas aproximações através de polinômio de sétima ordem .....	67
Figura 4.4 - Fluxograma geral do método proposto para localização de FAI em redes de distribuição .....	68
Figura 4.5 - Estimação de corrente de falta. (a) Tensão na fase em falta medida na subestação; (b) Corrente na fase em falta medida na subestação; (c) Corrente estimada no ponto de falta. ....	70
Figura 4.6 - Diagrama unifilar de um sistema de distribuição durante uma falta .....	71
Figura 4.7 - Modelo trifásico do sistema de distribuição.....	72
Figura 4.8 - Modelo artificial de um neurônio biológico .....	80
Figura 4.9 - Estrutura da RNA utilizada para estimar as constantes desconhecidas durante o semiciclo positivo da tensão no ponto de falta .....	81
Figura 4.10 - Estrutura da RNA utilizada para estimar as constantes desconhecidas durante o semiciclo negativo da tensão no ponto de falta.....	81
Figura 5.1 - Sistema IEEE 34 barras modificado utilizado para validação .....	86
Figura 5.2 - Estimação da corrente no ponto de falta. (a) Tensão na fase em falta medida na subestação; (b) Corrente na fase em falta medida na subestação; (c) Corrente no ponto de falta simulada (azul) e corrente no ponto de falta estimada (vermelho); (d) detalhe da corrente no ponto de falta simulada (azul) e estimada (vermelho). ....	88
Figura 5.3 - Critério de convergência. (a) Corrente estimada no ponto de falta; (b) $D_F$ estimada durante semiciclo positivo da tensão no ponto de falta; (c) $D_F$ estimada durante semiciclo negativo da tensão no ponto de falta. ...	90
Figura 5.4 - Análise da influência do tipo de solo .....	92
Figura 5.5 - Análise da influência da estimação da corrente no ponto de falta .....	93
Figura 5.6 - Análise da influência do ângulo incidência da FAI .....	95
Figura 5.7 - Curva de carga típica .....	96
Figura 5.8 – Análise da influência do carregamento do alimentador .....	96

Figura 5.9 - Análise comparativa entre o método proposto nesse trabalho e Iurinic, Orozco e Bretas (2015)..... 98

## LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 2.1 - Níveis típicos de corrente de curto-circuito em sistema 12,5 kV para diferentes materiais.....	34
Tabela 2.2 - Coeficientes dos polinômios de $R_1$ para cada tipo de solo (SANTOS et al., 2013a) .....	42
Tabela 4.1 - $SQ^2$ calculado para cada ordem de polinômio para os diferentes tipos de solos.....	66
Tabela 4.2 - Diferença entre $SQ^2$ calculado para cada ordem polinomial e o maior $SQ^2$ obtido em cada tipo de solo .....	66
Tabela 5.1 - Nós utilizados para simulações de FAIs.....	87
Tabela A. 1 - Tipos de configuração do sistema teste.....	113
Tabela A. 2 - Parâmetros do transformador .....	114
Tabela A. 3 - Configuração para cada nó do sistema teste.....	114
Tabela A. 4 – Cargas por nó .....	115
Quadro B. 1 - Magnitude dos pontos da curva $V \times I$ do solo tipo areia.....	117
Quadro B. 2 - Magnitude dos pontos da curva $V \times I$ do solo tipo asfalto .....	118
Quadro B. 3 - Magnitude dos pontos da curva $V \times I$ do solo tipo cascalho .....	119
Quadro B. 4 - Magnitude dos pontos da curva $V \times I$ do solo tipo paralelepípedo ....	120
Quadro B. 5 - Magnitude dos pontos da curva $V \times I$ do solo tipo grama .....	121
Quadro B. 6 - Magnitude dos pontos da curva $V \times I$ do solo tipo solo local.....	122



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
CESP	Companhia Energética de São Paulo
FAI	Faltas de Alta Impedância
RNA	Rede Neural Artificial
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
TW	Transformada Wavelet
PB	Paraíba



## LISTA DE SÍMBOLOS

$R_{Fo}$	Resistência de falta inicial
$\alpha$	Coefficiente definido pelo usuário
$\beta$	Coefficiente definido pelo usuário
$i_{Fo}$	Coefficiente definido pelo usuário
$k$	Grau do polinômio e índice de cada coeficiente
$c$	Coefficientes polinomial
$\Delta t$	Período de crescimento da corrente de falta
$v_{Fi}$	Tensão da curva V x I
$i_{Fi}$	Correntes da curva V x I
$m$	É o índice referente a posição da amostra
$v_1$	Tensão instantânea no terminal 1
$i_1$	Corrente instantânea no terminal 1
$i_{L1}$	Corrente instantânea no ramo série da linha
$i_{c1}$	Corrente capacitiva no terminal 1
$v_F$	Tensão no ponto de falta
$i_F$	Corrente no ponto de falta
$D_F$	Distância da subestação até a falta
$R$	Resistência série da linha por unidade de comprimento
$L$	Indutância série da linha por unidade de comprimento
$C$	Capacitância paralela por unidade de comprimento
$R_F$	Componente resistiva da falta
$L_F$	Componente indutiva da falta
$V_{Fp}$	Tensão de arco positiva
$V_{Fn}$	Tensão de arco negativa
$\hat{\theta}$	Vetor dos parâmetros a serem estimados (IURINIC, OROZCO E BRETAS, 2015)
$y$	Vetor de amostras $v_1$
$X$	Matriz de regressores

$V_{R_1}$	Tensão instantânea no resistor $R_1$
$V_{R_2}$	Tensão instantânea no resistor $R_2$
$\varepsilon_1$	Diferença entre dois valores de pico consecutivos
$T$	Período (1/60Hz)
$SSE$	Soma dos quadrados residuais
$SST$	Soma dos quadrados relativos a média
$\hat{V}_{FI}$	Valor estimado para tensão através dos polinômios
$\bar{V}_{FI}$	Valor médio das tensões da curva $V \times I$ ( $V_{FI}$ )
$SQ^2$	Erro quadrático relativo
$D$	Total de amostras da janela considerada
$i$	Corrente instantânea medida no relé
$t_i$	Instante de tempo da primeira amostra do semiciclo positivo da tensão da fase em falta após a etapa de <i>buildup</i>
$b$	Número arbitrário de períodos
$\varepsilon$	Diferença entre duas distancias estimadas para FAI ( $\varepsilon = 10$ )
$D_{Fr}$	Distância real de ocorrência da falta
$L_T$	Soma de todos os trechos do alimentador (91,29km)
$M$	Matriz de entradas das RNAs
$I$	Matriz de saídas da RNA
$P$	Vetor de pesos da RNA (parâmetros desconhecidos)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>25</b>
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	25
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO.....	26
1.3	MOTIVAÇÃO.....	26
1.4	CONTRIBUIÇÕES DA TESE.....	28
1.5	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	29
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	29
<b>2</b>	<b>CURTOS-CIRCUITOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO</b> .....	<b>31</b>
2.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	31
2.2	FALTAS DE BAIXA IMPEDÂNCIA.....	31
2.3	FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA.....	33
<b>2.3.1</b>	<b>Modelos computacionais para faltas de alta impedância</b> .....	<b>39</b>
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	43
<b>3</b>	<b>LOCALIZAÇÃO DE CURTOS-CIRCUITOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIA</b> .....	<b>45</b>
3.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	45
3.2	LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE BAIXA IMPEDÂNCIA.....	45
3.3	LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA.....	48
3.4	MÉTODO DE IURINIC, OROZCO E BRETAS (2015).....	51
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57
<b>4</b>	<b>PROPOSTA DA TESE</b> .....	<b>59</b>
4.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	59
4.2	TENSÃO NO PONTO DE FALTA.....	59
<b>4.2.1</b>	<b>Tensão em <math>R_1</math></b> .....	<b>60</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Tensão em <math>R_2</math></b> .....	<b>62</b>
4.3	MÉTODO PROPOSTO PARA LOCALIZAÇÃO DE FAI.....	67
<b>4.3.1</b>	<b>Bloco 1: Aquisição de dados</b> .....	<b>68</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Bloco 2: Estimação da corrente no ponto de falta</b> .....	<b>69</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Bloco 3: Modelo do alimentador durante FAIs</b> .....	<b>70</b>
<b>4.3.4</b>	<b>Bloco 4: Estimação dos Parâmetros desconhecidos através de uma RNA</b> .....	<b>78</b>
<b>4.3.5</b>	<b>Bloco 5: Critério de convergência</b> .....	<b>82</b>
4.4	CÁLCULO DAS DERIVADAS.....	83
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	84
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>85</b>
5.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	85
5.2	FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS UTILIZADAS.....	85
5.3	SISTEMA TESTE.....	86
5.4	CASO DETALHADO.....	87
5.5	INFLUÊNCIA DO TIPO DE SOLO.....	91
5.6	INFLUÊNCIA DA ESTIMAÇÃO DA CORRENTE NO PONTO DE FALTA ( $i_F$ ).....	92

5.7	INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE FALTA.....	94
5.8	INFLUÊNCIA DO CARREGAMENTO .....	95
5.9	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O MÉTODO PROPOSTO E IURINIC, OROZCO E BRETAS (2015).....	97
5.10	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	99
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>103</b>
6.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	104
6.2	ARTIGOS ACEITOS OU PUBLICADOS DURANTE O DOUTORADO .....	105
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>107</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>113</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os sistemas de distribuição de energia elétrica possuem uma característica predominantemente aérea, passando por regiões urbanas, industriais e rurais, totalizando uma elevada área de cobertura. Devido a isso, as redes de distribuição estão sujeitas a falhas causadas por condições climáticas críticas como ventos e descargas atmosféricas, além de acidentes envolvendo as estruturas da rede. Essas falhas podem ser temporárias como as geradas pelo contato de galhos de árvores com a rede durante tempestades, ou permanentes como àquelas causadas por rompimento de condutores devido à acidentes de trânsito ou quedas de árvores sobre a rede.

A correta identificação desses dois tipos de falhas é de suma importância, pois defeitos temporários podem provocar sobrecorrentes e sobretensões na rede ou até podem evoluir para faltas permanentes. As faltas permanentes devem ser identificadas e corrigidas no menor tempo possível, pois a falta de fornecimento de energia elétrica por parte da concessionária impacta diretamente nos seus indicadores de qualidade, além de causar transtornos aos seus clientes. Todos esses fatores geram prejuízos financeiros e à imagem das concessionárias.

A detecção de faltas, sejam elas temporárias ou permanentes, é mais facilmente realizada quando a resistência de contato é baixa e, conseqüentemente, a corrente de falta possui um valor elevado. Entretanto, em curtos-circuitos envolvendo superfícies de contato com alta resistência elétrica, a corrente de falta normalmente é inferior aos valores de ajuste dos sistemas tradicionais de proteção, assim não sendo detectados corretamente. Para esse tipo de falta, em que a corrente gerada está abaixo do limiar de disparo dos dispositivos tradicionais de proteção, dá-se o nome de Faltas de Alta Impedância (FAI) (HOU, 2007).

Diversos trabalhos têm sido publicados na literatura técnica com a intenção de desenvolver métodos para detecção de FAI. Apesar da relativa evolução nas técnicas de detecção, pouco tem se explorado com relação a técnicas de localização das FAIs. Se não há conhecimento do local da FAI, todo o alimentador deve ser desenergizado para que as equipes de manutenção possam percorrer o alimentador, localizar o defeito e iniciar os reparos necessários. Devido a isso, pode ser necessário que as

equipes tenham que se deslocar por longos trechos do alimentador a fim de localizar o defeito, tornando elevado o tempo de reestabelecimento da energia elétrica. Isso acaba por prejudicar a imagem da concessionária diante dos seus clientes, além de impactar diretamente nos seus indicadores de qualidade.

## 1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo principal desse trabalho é o desenvolvimento de um localizador de FAIs para redes aéreas de distribuição. Dentro desse objetivo, procura-se desenvolver algoritmos capazes de localizar FAIs em diferentes tipos de solos.

Como objetivos específicos, este trabalho visa:

- Propor um equacionamento para representar o comportamento de um alimentador durante FAIs, que utilizem os sinais instantâneos de tensão e corrente já medidos na subestação;
- Propor um único modelo matemático para as diferentes relações  $V \times I$  no ponto de falta, geradas durante FAIs em diferentes tipos de solos;
- Utilizar, no equacionamento proposto, as componentes de fase do sistema e considerar o efeito da capacitância *shunt* da rede;
- Desenvolver uma metodologia para localização de faltas em redes de distribuição que faça uso de uma frequência de amostragem adequada aos relés presentes nas concessionárias;
- Propor a utilização de uma Rede Neural Artificial (RNA) para estimação dos parâmetros desconhecidos das equações não lineares que modelam o comportamento dos alimentadores durante uma FAI;
- Estruturar a RNA de modo que não seja necessário o seu treinamento prévio, mas sim de modo que ela seja continuamente treinada após o início da FAI.

## 1.3 MOTIVAÇÃO

Quando um curto-circuito de baixa impedância ocorre em um sistema de distribuição, as equipes de manutenção devem percorrer longos trechos do alimentador para identificar o local do defeito e assim iniciar os reparos necessários.

O trecho percorrido pelas equipes pode ser reduzido através de informações oriundas de reclamações de um conjunto de consumidores e com base na atuação de dispositivos de proteção como, chaves fusíveis ou religadores. Entretanto, dependendo do local da falta e da abrangência do defeito, a atuação do equipamento de proteção pode desenergizar uma grande área. Além disso, no caso de curtos-circuitos em alimentadores rurais, a localização da falta tende a ser mais difícil do que nos urbanos, devido à dificuldade de comunicação dos consumidores com as concessionárias e pelo difícil acesso ao alimentador. Outro fator que dificulta a localização das faltas em sistemas de distribuição, urbanos ou rurais, é a sua característica ramificada, pois nesse tipo de sistema a rede possui diversas derivações e não apenas dois terminais como nas linhas de transmissão.

No caso de FAIs, o tempo para localização da falta é ainda mais elevado, pois as equipes de manutenção não têm o auxílio visual de operação das chaves fusíveis, já que esses equipamentos não atuam para faltas de alta impedância. Sendo assim, para esse tipo de falta, as equipes podem, dependendo do caso, contar apenas com as informações oriundas de consumidores como, por exemplo, informações referentes a cabos rompidos ou acidentes com as estruturas.

Logo, devido a todos esses fatores, o tempo de restabelecimento da energia elétrica pode ser ainda mais elevado do que para faltas de baixa impedância, prejudicando os consumidores e os indicadores de qualidade. Assim, um sistema capaz de estimar o local da ocorrência da falta, antes de enviar as equipes de manutenção, reduz consideravelmente o tempo de reestabelecimento, além de reduzir os gastos da concessionária com deslocamento e mão de obra das equipes.

Além da motivação sob o ponto de vista da aplicação prática, ainda existe motivação sob o aspecto científico. Diversos métodos têm sido publicados na literatura visando estimar a localização de faltas de baixa impedância, entretanto as FAI são pouco exploradas. Isso se deve as dificuldades inerentes desse tipo de falta, como as características aleatórias, componentes de alta frequência e assimetria da relação  $V \times I$  no ponto de falta. Além disso, grande parte dos métodos propostos para localizar FAIs necessitam da instalação de equipamentos de medição ao longo do alimentador o que gera custos extras para as concessionárias. Outros métodos utilizam sistemas que necessitam de treinamento prévio, sendo que, se a topologia da rede for alterada, o algoritmo deve ser treinado novamente.

A utilização das componentes de alta frequência, típicas das FAIs, é normalmente utilizada para localização desse tipo de defeito. Entretanto, para utilização dessas componentes, os métodos propostos na literatura utilizam altas frequências de amostragem, o que restringe a sua aplicação na maioria dos relés atualmente disponíveis comercialmente.

Por fim, os métodos propostos na literatura consideram apenas um tipo de solo em seus estudos, ou seja, consideram que todas as FAIs geram a mesma curva  $V \times I$  no ponto de falta. Como será detalhado no decorrer desse trabalho, cada tipo de solo gera uma curva  $V \times I$  distinta durante uma FAI. Devido a isso, os métodos tradicionais propostos na literatura apresentam limitações nesse sentido.

#### 1.4 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

A principal contribuição desse trabalho é a proposição de uma nova metodologia para estimação da distância de incidência de FAIs em redes aéreas de distribuição. Um dos aspectos inovadores desse trabalho está no desenvolvimento de um modelo matemático único para representar as diferentes curvas  $V \times I$  geradas durante uma FAI em diferentes tipos de solos.

Outro aspecto inovador desse trabalho está no uso de uma RNA para estimação dos parâmetros desconhecidos das equações não lineares que modelam o comportamento do alimentador durante a FAI. Essa RNA não necessita de treinamento prévio, ou seja, não é necessário que sejam previamente simuladas diversas situações de falta para o ajuste de seus pesos. Por sua vez, o treinamento da RNA é realizado de modo *online* e, somente, após o início da FAI. Dessa maneira, o método não necessita de ajustes prévios, bastando apenas as medições de tensão e corrente, que normalmente já são realizadas na subestação, e dos parâmetros elétricos do alimentador obtidos do banco de dados da concessionária.

Cabe ressaltar, que os dados de tensão e corrente adquiridos na subestação são amostrados em uma frequência de 3,84 kHz, adequada para implementação nos sistemas atuais de proteção.

## 1.5 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

Tendo apresentado os objetivos e contribuições da tese, torna-se necessária a exposição das suas delimitações. Sendo assim, o trabalho se delimita em:

- Localizar FAIs causadas pelo contato ao solo de condutores rompidos da rede primária de sistemas de distribuição;
- Abordar FAIs do tipo monofásicas com a presença de arco elétrico;

Além disso, considera-se que o método proposto tenha acesso:

- Ao instante que a FAI ocorre;
- Aos parâmetros elétricos do alimentador (impedância série e capacitância em paralelo);
- Aos dados oscilográficos de tensão e corrente, medidos na subestação, em uma frequência de amostragem de, no mínimo, 3,84 kHz.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho foi estruturado em seis capítulos, incluindo a introdução. O Capítulo 2 aborda as definições e conceitos relacionados aos curtos-circuitos em redes de distribuição de energia elétrica. Além disso, são apresentados os modelos propostos na literatura para simulação de FAIs, dando maior ênfase àquele utilizado nesse trabalho.

No Capítulo 3, a localização de faltas de baixa e alta impedância em sistemas de distribuição são abordadas. Essa abordagem é realizada de forma a evidenciar as diferentes metodologias propostas na literatura sobre o tema, bem como as vantagens e limitações das mesmas.

No Capítulo 4 a metodologia proposta nessa tese para localização de FAIs em redes de distribuição é elucidada. O modelo proposto para representar a tensão no ponto de falta durante FAIs em diferentes tipos de solos é detalhado e justificado através de uma análise gráfica e numérica. Nesse capítulo também é apresentada a estrutura da RNA utilizada para estimação dos parâmetros desconhecidos das equações que modelam o comportamento do alimentador durante a FAI.

O Capítulo 5 apresenta os resultados e discussões dos testes realizados com o algoritmo proposto. Ainda nesse capítulo é discutido o desempenho do algoritmo

proposto diante da influência dos diferentes tipos de solos, ângulos de incidência de falta e carregamento do alimentador. A eficácia da metodologia de estimação da corrente no ponto de falta também será discutida nesse capítulo. Por fim, será apresentada uma análise comparativa entre o método proposto nesse trabalho e o proposto por Iurinic, Orozco e Bretas (2015).

Para finalizar, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões obtidas através desse trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 CURTOS-CIRCUITOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

### 2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

O presente capítulo descreve as características dos diferentes tipos de curtos-circuitos em sistemas de distribuição de energia elétrica. Para isso essa seção será dividida em duas partes. Primeiramente, serão abordadas as características dos curtos-circuitos de baixa impedância, sendo eles monofásicos, bifásicos, bifásicos-terra e trifásicos. A seguir, as particularidades das faltas monofásicas de alta impedância serão elucidadas. Além disso, são apresentados os modelos para simulação de FAIs, sendo que o maior enfoque é dado ao modelo utilizado nesse trabalho.

### 2.2 FALTAS DE BAIXA IMPEDÂNCIA

Os curtos-circuitos podem se localizar nas diferentes partes do sistema de distribuição, tais como, em transformadores, reguladores de tensão, banco de capacitores ou nos cabos da rede. Os cabos abrangem uma grande área, principalmente devido a presença dos ramais laterais, típico dos sistemas de distribuição. Devido a isso, a probabilidade de uma falta ocorrer nos cabos da rede é maior do que em outros equipamentos. Essa probabilidade aumenta consideravelmente para as redes aéreas de distribuição quando comparada as redes subterrâneas.

Normalmente os curtos-circuitos em redes de distribuição são causados por descargas atmosféricas e tempestades e são divididos em dois tipos: faltas temporárias e faltas permanentes.

As faltas temporárias são aquelas que, após a operação de um equipamento de proteção, ocorre o religamento do circuito e a falta é eliminada. Em alguns casos, a falta é eliminada antes mesmo da operação do sistema de proteção como, por exemplo, no contato de galhos de árvores com a rede devido a vendavais. Segundo CPFL (2006), 80% das faltas em sistemas de distribuição são do tipo temporárias. Além disso, as causas mais comuns desse tipo de falha são (CPFL, 2006):

- Contato momentâneo entre cabos condutores;
- Descargas atmosféricas;

- Falha na isolação devido à umidade;
- Sobretensões de manobra.

Faltas permanentes são aquelas em que é necessária a intervenção das equipes de manutenção para que se corrija o motivo causador da interrupção antes de se religar o equipamento operado. Eventualmente, uma falta temporária pode evoluir para uma do tipo permanente caso não haja uma operação adequada dos equipamentos de proteção. Entre as possíveis causas desse tipo de falha, pode-se citar:

- Acidentes de trânsito envolvendo postes de energia;
- Quedas de galhos ou árvores sobre a rede;
- Atos de vandalismo;
- Quebra de isoladores, suportes ou cruzetas;
- Animais;
- Incêndios próximos a rede elétrica.

Os curtos circuitos transitórios e permanentes podem ainda serem divididos como:

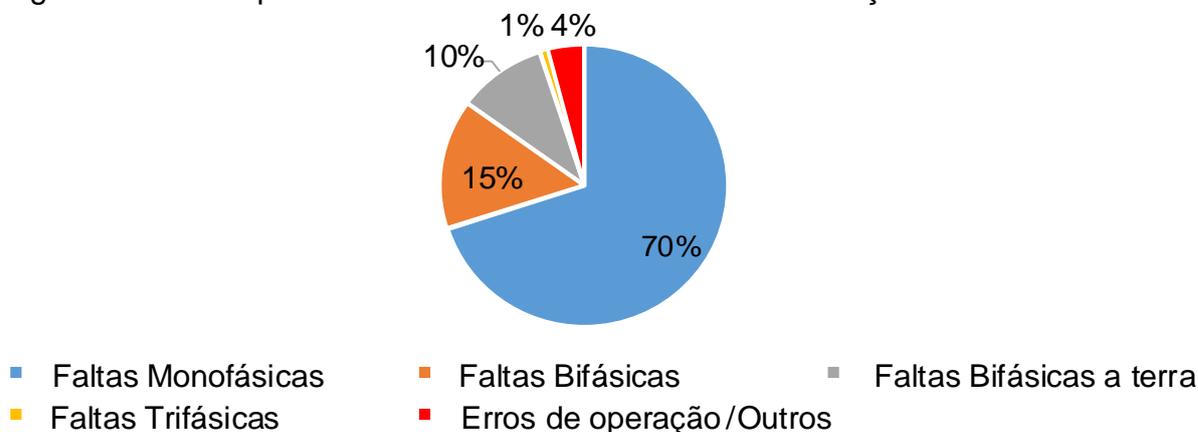
- Monofásicos: contato entre uma fase qualquer e a terra;
- Bifásicos: contato entre duas fases;
- Bifásicos a terra: contato entre duas fases e a terra.
- Trifásicos: contato simultâneo das três fases, com ou sem o envolvimento da terra.

Segundo Matos (2009), as faltas monofásicas são as mais frequentes em redes de distribuição. A Figura 2.1 apresenta as percentagens médias de ocorrência de cada tipo de falta em redes de distribuição. Os valores apresentados nessa figura podem variar dependendo das características do alimentador (urbano ou rural), do tipo de rede (aérea ou subterrânea) e do tipo de cabo (nus ou protegidos).

Devido as diversas possibilidade de faltas, os sistemas de distribuição contam com equipamentos de proteção instalados na subestação e ao longo do alimentador. Esses equipamentos, tem a função de detectar a ocorrência de um curto-circuito, seja transitório ou permanente, e promover a desconexão do equipamento ou do trecho da rede que estiver submetido a qualquer anormalidade que o faça operar fora dos limites operacionais previstos. Entre os principais dispositivos de proteção instalados nas

redes de distribuição, pode-se destacar o conjunto relé e disjuntor, religador e chave fusível.

Figura 2.1 - Principais causas de faltas em redes de distribuição aéreas



Fonte: Matos (2009)

De modo geral, em todos os casos de faltas, a impedância de falta possui um comportamento resistivo, pois a tensão e a corrente passam por zero no mesmo instante (SHORT, 2003). Essa característica se deve a presença de um arco elétrico. No caso de faltas permanentes de baixa impedância, pode-se considerar que a resistência de falta possui um comportamento linear (IURINIC, 2016). Se a falta for temporária, este comportamento se afasta da linearidade devido à existência predominante de um arco de alta corrente (DJURIC; TERZIJA, 1995). Entretanto, por definição esta falta continua sendo de baixa impedância por poder ser detectada mediante relés de sobrecorrente tradicionais (HOU, 2007).

### 2.3 FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

As FAIs são aquelas em que a corrente de falta está abaixo do limiar de disparo dos relés de sobrecorrente (HOU, 2007). Uma das causas desse tipo de falta é o rompimento e consequente contato de um condutor energizado com superfícies de alta resistividade elétrica como asfalto, areia ou pedras. As FAIs ocorrem normalmente em sistemas de distribuição com tensões de 4 kV até 34,5 kV, possuindo correntes de falta que variam de 0 A a menos de 100 A (TENGDIN, 1996; HOU, 2007).

Outro fato causador de FAIs são as fugas de corrente elétrica em isoladores (FANUCCHI, 2014). Esse fenômeno se deve ao acúmulo de poeira na superfície do

isolador ou por erros no processo de produção que acabam deixando pequenos orifícios no isolador. Caso o poste em que esse isolador esteja instalado seja aterrado, ocorrerá um curto-circuito com uma impedância menor e os sistemas tradicionais de proteção provavelmente irão atuar. Entretanto, se esse poste não for aterrado e ainda estiver instalado em superfícies com alta impedância como, por exemplo, solos arenosos ou tiver a sua base concretada, a impedância da falta será elevada e o sistema de proteção poderá não atuar. Nesse caso o condutor permanecerá energizado colocando em risco seres vivos que possam vir a entrar em contato com esse poste.

Devido as inúmeras possibilidades de curtos-circuitos que podem ocorrer nos sistemas de distribuição, nesse trabalho serão abordados apenas os curtos-circuitos causados pelo contato ao solo de condutores rompidos da rede primária. Sendo assim, a Tabela 2.1 apresenta alguns valores típicos de correntes de falta em um sistema de 12,5 kV para diferentes superfícies de contato. Como pode ser observado, esses valores são da mesma ordem de grandeza ou até inferiores, as correntes de carga dos alimentadores.

Tabela 2.1 - Níveis típicos de corrente de curto-circuito em sistema 12,5 kV para diferentes materiais

Superfícies	Corrente (A)
Asfalto seco	0
Areia seca	0
Concreto (não armado)	0
Areia molhada	15
Gramma seca	25
Gramma molhada	50
Concreto (armado)	75

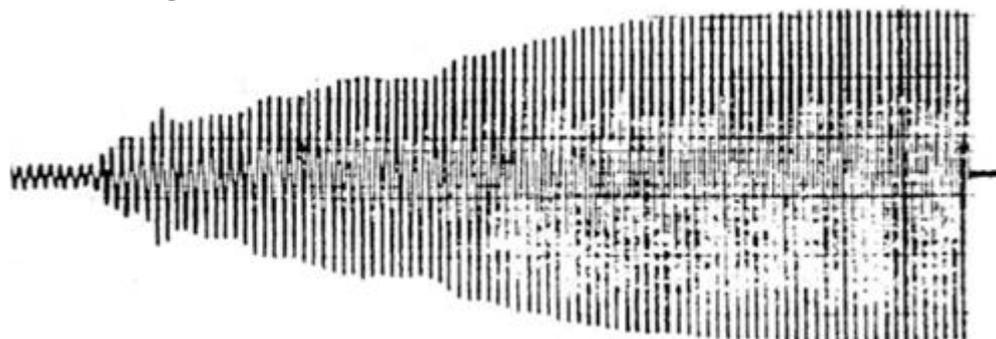
Fonte: Russel (1989)

Em 1985 a Companhia Energética de São Paulo (CESP) realizou um ensaio de FAIs lançando um cabo energizado a partir de um veículo de manutenção de linhas vivas em diversos pontos ao redor de uma subestação. Na Figura 2.2, pode-se observar a oscilografia do sinal de corrente do condutor que foi utilizado no ensaio. Nessa figura, pode-se notar o aspecto do crescimento da envoltória da corrente de defeito. Este comportamento é típico e se repete em quase todas as medições do ensaio, sendo conhecido como fase de *buildup* da corrente de falta de alta impedância.

O tempo de duração da etapa de *buildup* está relacionado ao tempo de acomodação do condutor energizado no solo (SANTOS et al., 2013a).

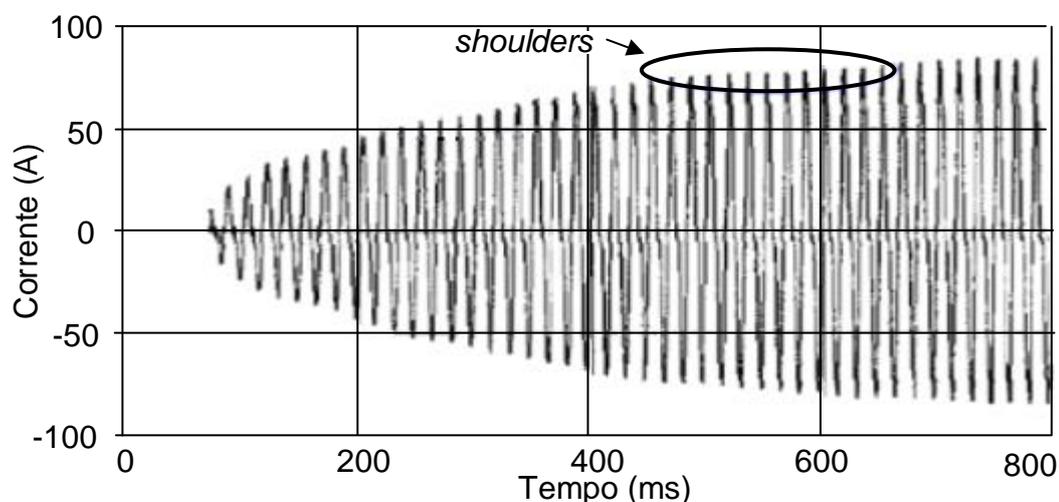
Como pode ser visto na Figura 2.3, durante a etapa de *buildup*, existem alguns trechos em que a amplitude permanece constante durante um determinado tempo antes de voltar a crescer. Esses trechos são denominados de *shoulders* (NAN, 2001).

Figura 2.2 - Oscilografia da corrente no condutor utilizado no ensaio da CESP



Fonte: CESP (1985)

Figura 2.3 - Detalhe dos *shoulders*



Fonte: Adaptado de CESP (1985)

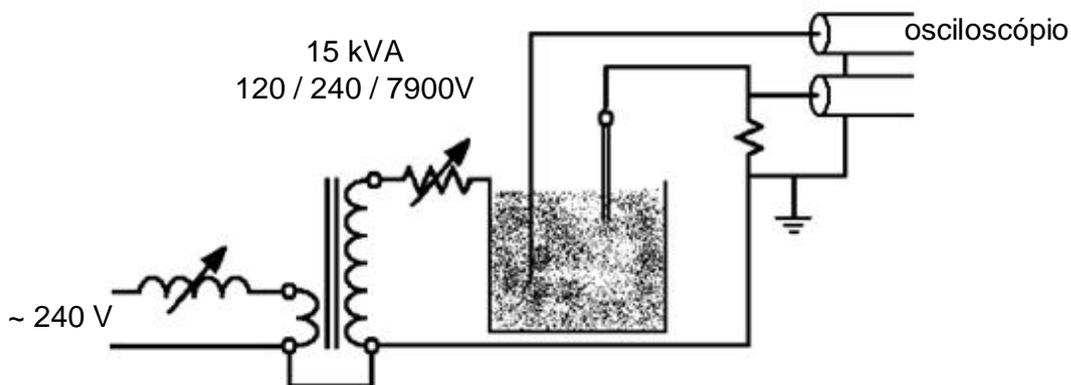
Diversos fatores tornam as correntes geradas pelas FAIs aleatórias e dinâmicas. Um condutor energizado ao entrar em contato com o solo gera arcos elétricos. A presença desse arco elétrico pode fazer com que o condutor não permaneça parado na superfície do solo devido ao surgimento de uma força eletromagnética. A magnitude da corrente de falta se altera à medida que a umidade da superfície do solo é reduzida em função do calor gerado pela falta e/ou à medida que os materiais de silício do solo são aquecidos, transformando-se em substâncias

vitrificadas. Os solos, durante diferentes estações do ano e de acordo com diversas regiões geográficas, também produzem diferentes amplitudes de correntes de falta.

O arco elétrico presente nas FAI é o responsável pela assimetria na relação  $V \times I$  no ponto de falta em todos os ciclos durante a falta. Essa assimetria é traduzida em componentes de frequência distintas da fundamental e está relacionada a variação na resistência elétrica do arco elétrico e das superfícies durante a FAI. Assim como as faltas de baixa impedância, as FAIs também possuem um comportamento resistivo, pois no instante que a tensão é zero, a corrente também será (EMANUEL et al., 1990). Devido a essas características, pode-se considerar que todas as FAIs possuem um comportamento resistivo não linear.

Para analisar a característica assimétrica da corrente do arco elétrico, Emanuel (1990) realizou um experimento sobre o comportamento do arco elétrico no interior de um solo arenoso. O experimento apresentado na Figura 2.4, consiste na aplicação da tensão secundária (7,9 kV) de um transformador em um vaso metálico cilíndrico contendo areia. Um resistor variável é conectado em série para simular e variar a resistência de terra.

Figura 2.4 - Experimento para caracterização de arco elétrico

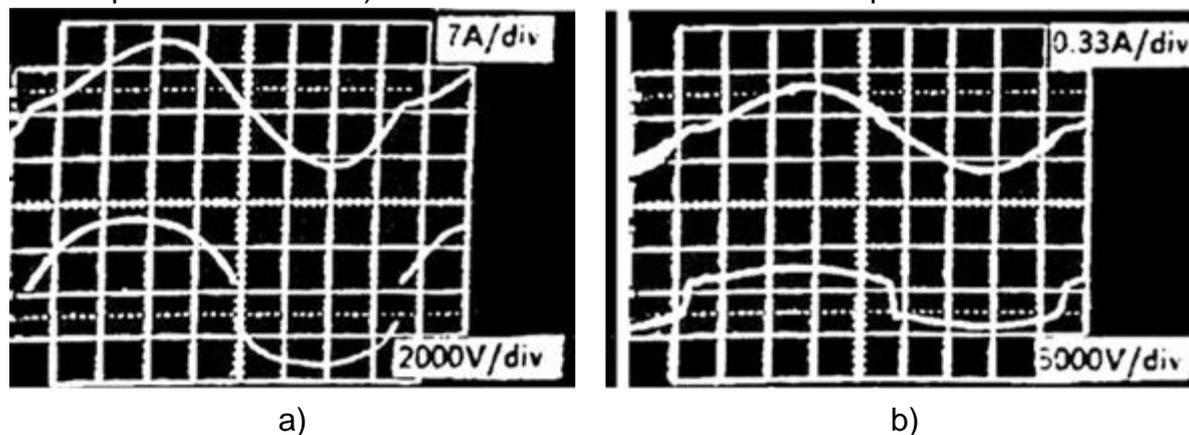


Fonte: Emanuel (1990)

Os resultados obtidos no experimento são apresentados na Figura 2.5. Nessa figura, pode-se perceber a assimetria nos sinais da corrente de falta, característica do arco elétrico, sendo que a magnitude do semiciclo positivo é maior que a do semiciclo negativo. Além disso, a tensão no ponto de falta também apresenta certa assimetria, entretanto nesse caso, a amplitude do semiciclo positivo é menor que no negativo. Esse comportamento é característico de faltas tanto com grande corrente de curto-

circuito (Figura 2.5a) como com pequena corrente de curto-circuito (Figura 2.5b), desde que haja a ocorrência de arco.

Figura 2.5 - Formas de corrente e tensão de arco elétrico. a) Corrente de curto-circuito com amplitude elevada. b) Corrente de curto-circuito com amplitude reduzida.



Fonte: Emanuel (1990)

Em Santos et al. (2013a), os autores ampliaram os estudos referentes ao comportamento das FAIs, ao realizarem ensaios em seis diferentes tipos de superfícies, afim de justificar uma modificação no sistema para simulação de FAIs proposto por Nan et al. (2001). Até então, os trabalhos publicados utilizavam apenas um tipo de superfície em seus estudos: areia (EMANUEL, 1990), pedregulhos (NAN et al., 2001) e grama (NAKAGOMI, 2006). Sendo assim, ensaios com superfícies como o asfalto, bastante comum nas cidades, ainda não haviam sido realizados.

Nos ensaios realizados por Santos et al. (2013a), foram utilizados seis pequenas áreas, conforme a Figura 2.6, com as diferentes superfícies consideradas, onde foi colocado em contato um condutor energizado em  $13,8/\sqrt{3}$  kV . Através de um transformador de corrente (TC) e um transformador de potencial (TP), instalado no último poste a montante das superfícies de ensaio, foram obtidas as curvas  $V \times I$  para cada uma dessas superfícies (Figura 2.7). Cada uma das curvas  $V \times I$  são formadas por dois ramos distintos, um ramo ascendente (pontos em azul), composto pelos valores que definem o aumento da tensão e da corrente, partindo do menor ao maior valor de ambas as grandezas, e o ramo descendente (ponto em vermelho), definido pelos pontos que iniciam no maior valor de tensão e corrente e terminam nos menores valores das grandezas. A magnitude dos pontos das diferentes curvas da Figura 2.7 são apresentados no Apêndice B.

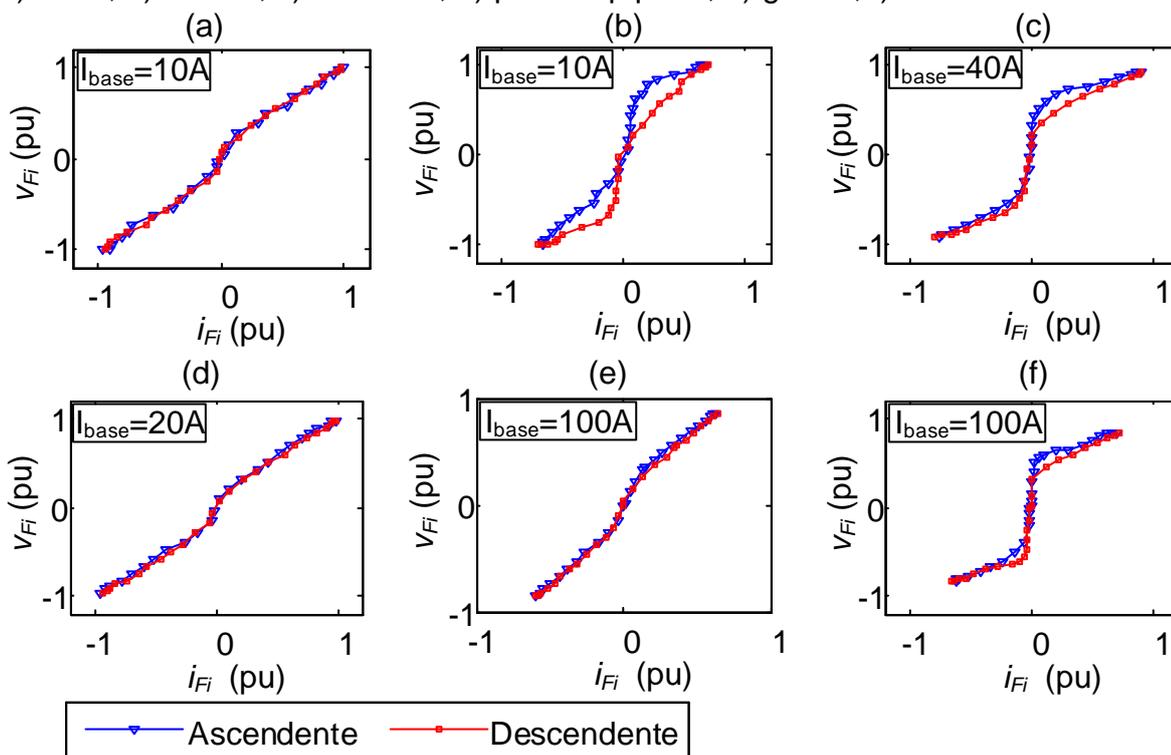
Como pode ser observado através da Figura 2.7, os diversos tipos de solo ocasionam diferentes amplitudes na corrente no ponto de falta e, principalmente, diferentes assimetrias na relação  $V \times I$ . Superfícies como asfalto e o solo local onde foram realizados os ensaios (Boa Vista-PB), possuem curvas  $V \times I$  que se distinguem de forma considerável em relação aos outros tipos de superfícies. Sendo assim, as particularidades de cada tipo de superfície, devem ser consideradas nos estudos referentes a localização de FAIs, pois no instante da falta não se tem conhecimento em qual superfície essa está ocorrendo.

Figura 2.6 - Estrutura utilizada nos ensaios



Fonte: Santos et al. (2013a)

Figura 2.7 - Curvas  $V \times I$  correspondente a um ciclo da FAI em cada tipo de superfície: a) areia, b) asfalto, c) cascalho, d) paralelepípedo, e) grama, f) solo local



Fonte: Adaptado de Santos et al. (2013a)

Entre as concessionárias distribuidoras de energia elétrica existem diferentes opiniões sobre a frequência em que ocorre uma FAI. Esse impasse se deve aos poucos registros com relação a esse tipo de falta, pois apenas os curtos-circuitos que resultam na operação de uma chave fusível ou de um relé são registrados no banco de dados da concessionária. Entretanto, segundo Wester (1998) entre 5% e 20% de todas as faltas que ocorrem nos sistemas de distribuição são FAIs.

### 2.3.1 Modelos computacionais para faltas de alta impedância

Devido ao crescente interesse dos pesquisadores sobre os estudos referentes às FAIs, diversos trabalhos vêm sendo publicados com foco na modelagem deste tipo de perturbação.

O modelo mais simples de FAI utiliza uma resistência fixa de valor elevado conectada entre o ponto de falta e a terra. Esse modelo possui a desvantagem de não gerar nenhum tipo de assimetria na relação  $V \times I$  no ponto de falta, ou seja, a curva  $V \times I$  é linear. No entanto, sabe-se que, nos casos de FAI há o aparecimento de arcos elétricos, os quais causam muitas distorções na forma de onda da corrente e tensão. Devido a isso, esse modelo é pouco utilizado pelos pesquisadores.

Outro modelo para faltas de alta impedância proposto na literatura é utilizado em Sharaf (2003), Xiangjun (2002), entre outros trabalhos. Esse modelo utiliza uma impedância de falta variável, conectada entre o ponto de falta e a terra. Essa impedância contém uma resistência de falta  $R_F$  calculada conforme a equação (2.1) e uma indutância de falta  $L_F$  que possui um valor típico igual a 3mH.

$$R_F = R_{F0} \cdot [1 + \alpha \cdot (\frac{i_F}{i_{F0}})^\beta] \quad (2.1)$$

Onde:

$R_{F0}$  é a resistência de falta inicial;

$\alpha$  é o coeficiente definido pelo usuário;

$\beta$  é o coeficiente definido pelo usuário;

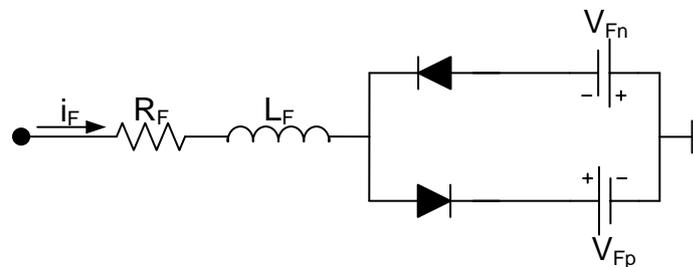
$i_F$  é a corrente de falta;

$i_{F0}$  é a corrente de falta inicial.

Com exceção das variáveis  $R_F$  e  $i_F$ , todas as outras variáveis da equação (2.1) são definidas pelo usuário empiricamente. Isso faz com que esse modelo, apesar de ser de simples implementação, seja específico para cada trabalho, tornando o processo de validação do método duvidoso diante de aplicações reais.

Outro modelo bastante utilizado para faltas de alta impedância é proposto por Emanuel (1990). Esse modelo foi proposto para representar a curva  $V \times I$  de uma FAI em um solo arenoso. Para isso, utiliza dois diodos e duas fontes de tensões contínuas, conectadas em antiparalelo. Entre a fonte e os diodos são conectadas uma resistência  $R_F$  e uma indutância  $L_F$ . Esse modelo é ilustrado na Figura 2.8.

Figura 2.8 - Modelo de FAI utilizando diodos e fonte CC



Fonte: Adaptado de Emanuel et al. (1990)

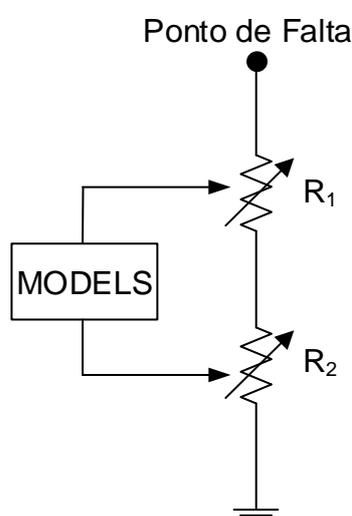
Quando a tensão  $v_F$  estiver no semiciclo positivo, a corrente flui através de  $V_{Fp}$ , enquanto no semiciclo negativo de  $v_F$  a corrente irá fluir através de  $V_{Fn}$ . A assimetria da relação  $V \times I$  é controlada através dos parâmetros  $V_{Fp}$  e  $V_{Fn}$ , e seus valores dependem da compactação, porosidade e umidade do solo. Embora esse método possibilite uma certa variação nas curvas  $V \times I$ , esse modelo foi proposto para representar a curva  $V \times I$  típica de um solo arenoso, apresentando certas limitações para representação de outros tipos de solos. Além disso, esse modelo não é capaz de representar as fases de *buildup* e *shoulders* (NAN et al., 2001).

O modelo utilizado nesse trabalho foi inicialmente proposto por Nan et al. (2001) e aperfeiçoado em Santos et al. (2013a), onde diferentes superfícies de contato foram incluídas nos estudos. Esse modelo foi escolhido por possibilitar a simulação de FAIs em diferentes tipos de superfícies, além de reproduzir de forma adequada as etapas de *buildup* e *shoulders*.

A Figura 2.9 apresenta o modelo inicialmente proposto em Nan et al. (2001). Esse modelo faz uso de duas resistências variáveis em série. A primeira resistência

( $R_1$ ) modela o período de *buildup* da FAI, ou seja, a característica de crescimento da corrente de falta durante o período de acomodação do condutor no solo. Para isso,  $R_1$  possui um valor elevado no início da falta e diminui seu valor de forma gradativa ao longo do tempo até um valor próximo a zero. Para representar esse comportamento, Santos et al. (2013a) propôs a utilização de um polinômio conforme a equação (2.2). A ordem desse polinômio, bem como os seus coeficientes, depende do tipo de solo em que a FAI incidiu. Esses parâmetros foram validados através de testes em campo e podem ser verificados na Tabela 2.2.

Figura 2.9 - Modelo de duas resistências variáveis controlada por MODELS



Fonte: Adaptador de Nan et al. (2001)

$$R_1(t) = \begin{cases} c_k \cdot t^k + c_{k-1} \cdot t^{k-1} + \dots + c_1 \cdot t + c_0, & \text{se } t < \Delta t \\ 10^{-5}, & \text{se } t \geq \Delta t \end{cases} \quad (2.2)$$

Onde:

$k$  é o grau do polinômio e índice de cada coeficiente;

$c$  são os coeficientes do polinômio;

$\Delta t$  é o período de crescimento da corrente de falta.

Tabela 2.2 - Coeficientes dos polinômios de  $R_1$  para cada tipo de solo

Coeficiente	Superfície					
	Areia	Asfalto	Cascalho	Paralelepípedo	Gramma	Solo local
$C_8$	6.9E11	3.1E12	7.1E7	4.8E9	3.6E10	0
$C_7$	-5.8E11	-2.9E12	-1.7E8	-7.9E9	3.6E10	0
$C_6$	2,00E+11	1.1E12	-1.7E8	5.3E9	1.3E10	0
$C_5$	-3.8E10	-2.3E11	-9.1E7	-1.8E9	-2.6E9	-3.2E6
$C_4$	4.1E9	2.9E10	2.8E7	3.6E8	3.1E8	2.8E6
$C_3$	-2.7E8	-2.1E9	-5.3E6	-4.1E7	-2.1E7	-8.3E5
$C_2$	9.4E6	8.5E7	5.6E5	2.5E6	8.3E5	1.1E5
$C_1$	-1.8E5	-1.7E6	-3.3E4	-7.7E4	-1.7E4	-6.9E3
$C_0$	1.7E3	-1.7E6	1.1E3	1.3E3	2.1E2	5.1E2

Fonte: SANTOS et al. (2013a)

A segunda resistência ( $R_2$ ), modela a característica assimétrica da curva  $V \times I$  devido a presença do arco elétrico e está presente em todos os ciclos da corrente de falta. Para isso, uma rotina verifica se a tensão no ponto de falta está no ramo crescente (derivada positiva) ou decrescente (derivada negativa) da curva  $V \times I$  da superfície que se deseja simular a FAI. Após verificado o ramo, a rotina utiliza a equação (2.3) para obter a respectiva corrente de falta da curva  $V \times I$ . Por fim, calcula-se a correspondente resistência através da 1ª Lei de OHM.

Na primeira versão do modelo proposta por Nan et al. (2001),  $R_2$  era calculada apenas com os dados da curva  $V \times I$  referente a uma superfície de pedras. Entretanto, na modificação proposta por Santos et al. (2013a), o modelo se tornou mais completo, sendo acrescentadas as curvas  $V \times I$  de outras seis superfícies conforme a Figura 2.7.

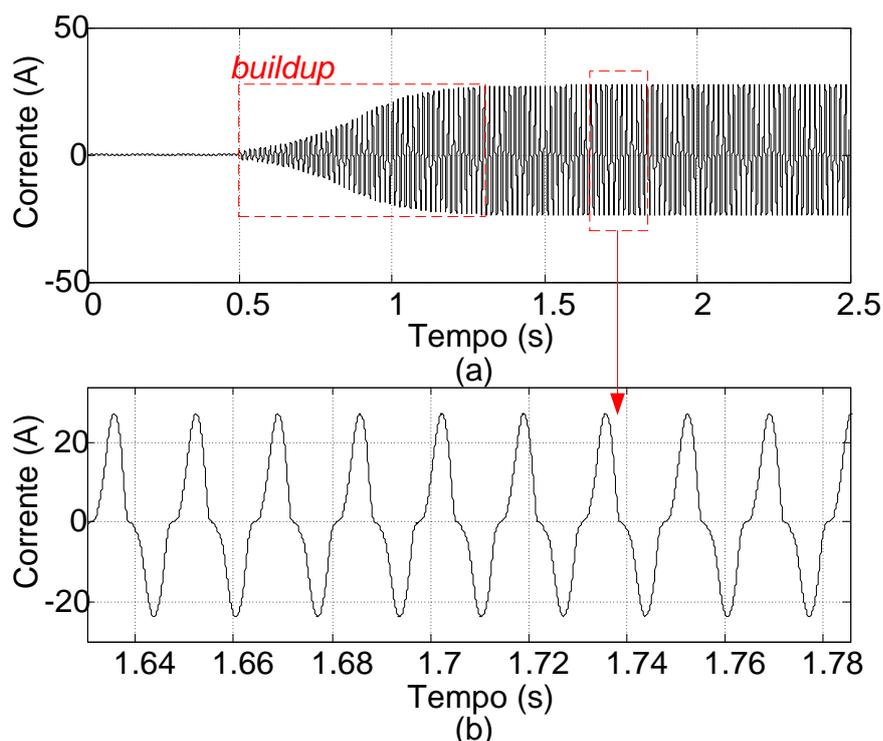
$$i_F(t) = \begin{cases} i_{Fi}(m) + \frac{i_{Fi}(m+1) - i_{Fi}(m)}{v_{Fi}(m+1) - v_{Fi}(m)} \times \Delta v, & \text{se } v_{Fi}(m) < v_F(t) < v_{Fi}(m+1) \\ i_{Fi}(m), & \text{se } v_F(t) = v_{Fi}(m) \end{cases} \quad (2.3)$$

onde  $v_F(t)$  é a tensão no ponto de falta;  $v_{Fi}(m)$  e  $i_{Fi}(m)$  são as tensões e correntes da curva  $V \times I$  na amostra  $m$ , respectivamente;  $\Delta v = v_F(t) - v_{Fi}(m)$ .

Para exemplificar o desempenho do modelo na simulação de FAIs, a Figura 2.10a apresenta o sinal de corrente no ponto de falta para uma FAI em uma superfície de cascalho. Nessa figura, pode-se perceber a etapa de *buildup* gerada pelo controle de  $R_1$  entre os instantes 0,5 s e 1,3 s. Já na Figura 2.10b, pode-se observar em maiores detalhes a assimetria gerada pela mesma FAI, a qual é modelada pelo

controle da resistência  $R_2$ . Essas figuras mostram que os resultados obtidos através desse modelo são muito próximos das medições reais apresentadas na literatura técnica.

Figura 2.10 - Corrente no ponto de falta durante uma FAI em uma superfície de cascalho: a) detalhe etapa de *buildup*, b) detalhe assimetria



Fonte: O autor

## 2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo apresentou as características dos diferentes tipos de faltas possíveis de ocorrer nos sistemas de distribuição, com ênfase nas particularidades das FAIs. Dentre dessas particularidades, destaca-se a não linearidade das curvas  $V \times I$  causada pela presença do arco elétrico. Além disso, destacou-se que o tipo de superfície em que a FAI ocorreu influencia diretamente nas características de amplitude e, principalmente, assimetria dessas curvas. Devido a isso, é de extrema importância que os diferentes tipos de solos sejam considerados no desenvolvimento de algoritmos para localização de FAIs.

Por fim, o capítulo apresentou os diferentes modelos propostos na literatura para simulação de FAIs. O modelo utilizado nesse trabalho foi escolhido pela simplicidade na simulação de FAIs em diferentes tipos de solos, bastando apenas que

seja alterada a curva  $V \times I$  implementada no modelo. Além disso, o modelo utilizado também permite a simulação das etapas de *buildup* e *shoulders*.

### **3 LOCALIZAÇÃO DE CURTOS-CIRCUITOS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO PRIMÁRIA**

#### **3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS**

Atualmente, o procedimento de localização de faltas em sistemas de distribuição é realizado de forma visual, sendo que as equipes precisam percorrer os diversos trechos dos alimentadores para identificar o defeito. Em alguns casos, as reclamações de falta de energia elétrica por parte dos consumidores, atua como um pré-filtro para localização da falta, entretanto dependendo do local do curto-circuito, muitos consumidores podem ser afetados e assim será grande a área que as equipes precisarão percorrer. A operação de chaves fusíveis também pode ser útil na localização de faltas, entretanto apenas para as de baixa impedância, já que para FAIs esse dispositivo, normalmente, não opera. Dessa maneira, a utilização apenas destes procedimentos para a localização de faltas não é suficiente, na medida em que é crescente a preocupação com a qualidade da energia elétrica e com a confiabilidade dos sistemas.

Sendo assim, a seguir, será realizada uma revisão das estratégias de solução mais promissoras para localização de faltas em redes de distribuição, dando ênfase as suas vantagens e limitações. Inicialmente serão tratadas as faltas de baixa impedância, enquanto em um segundo momento serão abordados os métodos referentes a localização de FAIs.

#### **3.2 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE BAIXA IMPEDÂNCIA**

A grande maioria das pesquisas realizadas até o momento sobre localização de faltas focam em sistemas de transmissão. Isso ocorre porque o impacto dos curtos-circuitos nas linhas de transmissão e o tempo para recolocá-las em operação é muito maior do que nos sistemas de distribuição. Entretanto, a partir de 1980, a localização de faltas em sistemas de subtransmissão e distribuição passaram a receber maior atenção devido a cobrança de indicadores de qualidade por parte dos órgãos regulamentadores (SAHA, IZYKOWSKI E ROSOLOWSKI, 2010).

A estimação da distância da falta em sistemas de distribuição é mais complexa do que nas linhas de transmissão. Isso ocorre, entre outros fatores, devido a presença

de ramais laterais, configuração assimétrica da rede e operação desbalanceada. Além disso, ao contrário das linhas de transmissão, os sistemas de distribuição normalmente possuem medições de tensão e corrente apenas em um terminal (subestação). Sendo assim, devido a essas diferenças, os métodos existentes para localização de faltas em linhas de transmissão não podem ser utilizados diretamente nas redes de distribuição.

Estudos ao longo dos últimos anos utilizaram diferentes métodos para localização de faltas em redes de distribuição. Entre esses métodos, pode-se citar como os mais promissores as ondas viajantes, redes neurais e impedância aparente.

De acordo com Saha, Izykowski e Rosolowski (2010) as ondas viajantes, são sinais transitórios, de alta frequência, da corrente e tensão que se propagam na direção da carga e da fonte a partir do ponto de falta. Informações como o tempo de chegada desses sinais nos equipamentos de monitoramento ou as frequências dos sinais transitórios podem ser utilizados para estimação do local de incidência da falta. Devido a análise de componentes de altas frequências, métodos como os propostos em Han et al. (2007), Borghetti, Bossetti e Silvestro (2008), que utilizam essa técnica, necessitam de uma alta taxa de amostragem. Outro fator limitante dessa metodologia é a presença de ramais laterais que reduzem a amplitude das ondas viajantes, afetando o desempenho dos métodos de localização. Para contornar esse problema, alguns trabalhos publicados na literatura técnica sugerem a instalação de equipamentos de medição ao longo do alimentador, assim reduzindo as perdas de informações, entretanto aumentando os custos de implementação.

As RNAs são utilizadas em várias aplicações como reconhecimento de padrão. Isso se deve ao fato delas serem não lineares, o que permite elas captarem interações complexas entre as variáveis analisadas, semelhante ao que ocorre no mundo real. As RNAs têm como base o conhecimento adquirido através da experiência, ou seja, após realizado o treinamento, a RNA é capaz de identificar e classificar corretamente um amplo número de casos. Sendo assim, devido as características de aprendizagem e capacidade de generalização, diversos autores têm utilizado as RNAs para detectar e diferenciar curtos-circuitos de chaveamentos normais em alimentadores. Além disso, as RNAs também têm sido utilizadas em algoritmos desenvolvidos para localização de curtos-circuitos de baixa impedância (ASLAN, 2012, ZAYANDEHROODI et al., 2013).

As principais vantagens dessa metodologia estão justamente na capacidade de generalização, ou seja, apresentado um determinado padrão à rede, essa é capaz de classificar corretamente um grande número de casos, mesmo que esses não estejam completamente dentro do padrão utilizado no treinamento. A desvantagem dos métodos que utilizam RNAs está no processo *offline* de treinamento. Nesse tipo de treinamento, inúmeros casos devem ser previamente simulados para gerar os padrões que serão utilizados no treinamento da rede. Esse processo é extremamente oneroso, principalmente quando o número de padrões é elevado como, por exemplo, em um algoritmo para localização de curtos-circuitos. Além disso, sempre que se desejar acrescentar um novo padrão como, por exemplo, quando a topologia da rede é alterada, a RNA deve ser treinada novamente.

Os métodos fundamentados no cálculo da impedância aparente (RAMAR E NGU, 2010; LIAO, 2011; ALAMUTI et al., 2012, GAZZANA et al., 2014) utilizam as componentes fundamentais da tensão e corrente medidas na subestação, durante a falta, para calcular a impedância vista a partir desse terminal. Essa impedância é então comparada com a impedância da rede para estimar a distância onde ocorreu o curto-circuito. Esses métodos, de modo geral, não necessitam da instalação adicional de nenhum tipo de equipamento de medição no alimentador, pois todas os dados necessários são obtidos das medições já realizadas na subestação. Além disso, o fato de utilizarem as componentes fundamentais da tensão e corrente, permitem o uso de uma taxa de amostragem baixa, quando comparadas as metodologias que fazem uso de ondas viajantes.

Uma das dificuldades dos métodos que utilizam a impedância aparente é a possibilidade de múltiplas estimativas da distância da falta. Isso ocorre devido a existência de mais de um ponto no alimentador com a mesma impedância para um único curto-circuito. O problema da múltipla estimativa é tratado em diversos trabalhos, sendo que diferentes metodologias de solução são propostas. Entre essas propostas, pode-se citar a instalação de indicadores de falta instalados no início de cada um dos ramais (TENG, HUAG e LUAN, 2014). A informação desses indicadores é combinada com os resultados das múltiplas estimativas, retornando somente um local de falta. Essa é uma solução eficaz, entretanto de alto custo econômico devido ao elevado número de ramais nos alimentadores.

O conhecimento dos locais onde estão instalados os equipamentos de proteção, bem como suas características de operação, também pode ser utilizado

para solução do problema da múltipla estimativa. Duas evidências podem ser utilizadas para a isso: sequência de eventos extraída das medidas de tensão e corrente e a variação da carga durante a atuação dos equipamentos de proteção. Enquanto o primeiro possibilita a determinação dos equipamentos de proteção que atuaram (com base na sequência temporal de eventos e da corrente de falta), o segundo possibilita a determinação dos consumidores afetados pela atuação do sistema de proteção (SALIM, 2008).

As diferentes metodologias comentadas anteriormente também são utilizadas em métodos que fazem uso de medições que já estão disponíveis ao longo do alimentador (religadores, seccionadores, geração distribuída) ou que devem ser instaladas. Esses métodos combinam as medições extras com técnicas como impedância aparente (FLOREZ, NÚÑEZ e CAICEDO, 2007), componentes de alta frequência (SENGER et al., 2005; BORGHETTI et al., 2006, SADEH, BAKHSHIZADEHB e KAZEMZADEHB, 2013; GAUDARZI et al., 2015) e análise dos fasores de tensão e corrente (CAMPOCCIA et al., 2010; GOHAKAR e KHEDKAR, 2005; BRAHMA, 2011; JIA et al., 2015; JAMALI e BAHMANYAR, 2016; ESPINAL, FLOREZ e LONDONO, 2016; BISCARO et al., 2016) para determinar o local da falta. Esses métodos, apesar de apresentarem resultados promissores, são financeiramente onerosos para as concessionárias, pois além da instalação de novos medidores ao longo do alimentador, também se faz necessário uma comunicação entre esses dispositivos e a central de processamento, normalmente, na subestação.

### 3.3 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

Artigos científicos sobre localização de FAI em sistemas de distribuição são escassos, sendo que a maioria dos trabalhos sugere a instalação de dispositivos de medição remota ou indicadores de falta ao longo do alimentador, visando obter mais informações que possibilitem resolver o problema (IURINIC, 2016).

A presença do arco elétrico, durante as FAIs, gera características específicas para esse tipo de falta. Entre essas características, destaca-se a não linearidade da relação  $V \times I$ , além da presença de componentes de alta frequência. Devido a isso, as técnicas tradicionais de localização de faltas propostas na literatura não podem ser utilizadas diretamente na localização das FAIs. A característica ramificada dos alimentadores, variações nas impedâncias da rede devido a mudança da seção dos

condutores e as cargas desequilibradas também aumentam a complexidade do problema de localização desse tipo de defeito.

Essas características exigem que os métodos de localização de FAIs utilizem ferramentas matemáticas robustas e com boa capacidade de generalização como as RNAs (MORETO, 2005; BRETAS et al., 2006; SILVA et al., 2011). Esses métodos partem do pressuposto que diferentes locais de incidência da FAI irão gerar diferentes características nas componentes fundamentais e de altas frequências das tensões e das correntes. Essas diferentes características podem ser geradas através de simulações computacionais e utilizadas como padrões para o treinamento de uma RNA. Sendo assim, no instante que uma FAI for detectada por um método adequado, as atuais componentes fundamentais e de alta frequência serão utilizadas como entrada na RNA que irá gerar como saída uma estimativa para o local do defeito.

Apesar dos bons resultados obtidos pelas RNAs, a necessidade de treinamento *offline* pode ser um empecilho para seu uso em alimentadores de grande porte. Isso porque os padrões utilizados no treinamento da RNA devem ser simulados previamente, sendo que o número de simulações é proporcional ao tamanho do alimentador. Apesar disso, os benefícios da RNA podem ser utilizados, sem a desvantagem do treinamento *offline*, em algoritmos que podem ser treinados de forma *online*, ou seja, sem a necessidade de nenhum treinamento prévio. Nesse tipo de algoritmo, os pesos da RNA são calculados de forma contínua e somente após a execução do algoritmo.

Em Flauzino (2007), é proposto um algoritmo que utiliza a decomposição dos sinais de corrente e tensão em componentes ortogonais, bem como o uso de sistemas de inferência Fuzzy para detecção, classificação, localização e estimativa da resistência de falta. A ideia base do algoritmo proposto em Flauzino (2007) é utilizar as componentes ortogonais calculadas, a partir de 974 simulações realizadas, para ajustar um sistema Fuzzy através de pares de entradas (componentes ortogonais) e saídas (distância da falta). Sendo assim, quando uma FAI é detectada, o algoritmo extrai as componentes ortogonais dos sinais atuais de tensão e corrente e as utiliza como entrada no sistema Fuzzy que irá estimar o local da falta. Esse tipo de algoritmo, assim como as RNAs, exigem uma grande quantidade de padrões que muitas vezes dificultam a implementação.

Alguns trabalhos publicados na literatura utilizam as componentes de altas frequências, que surgem durante as FAIs, para detecção e localização desse tipo de

defeito (ELKALASHY et al., 2008; BAKAR et al., 2013; SANTOS et al., 2013b; ALI et al., 2014; HONG e HUANG, 2014). A Transformada Wavelet (TW) é uma das ferramentas matemáticas mais utilizadas para essa análise, pois permite analisar um sinal em diferentes espectros de frequência no tempo. Essa ferramenta é extremamente útil para detecção de FAIs, entretanto a etapa da localização necessita de uma outra abordagem matemática em conjunto. Essa outra abordagem, normalmente uma RNA, é utilizada para comparar os padrões extraídos pela TW com padrões pré-armazenados. Sendo assim, um treinamento prévio também é exigido. Além disso, devido a análise ser realizada em componentes de altas frequências, os algoritmos que utilizam a TW exigem uma frequência de amostragem elevada, cujo valor é superior a maioria dos relés atuais. Por exemplo, a metodologia proposta em Elkalashy et al. (2008), exige uma frequência de amostragem de, no mínimo, 100kHz, sendo que os relés atuais trabalham normalmente na faixa dos 7,67 kHz (SEL, 2015).

Outra linha de pesquisa promissora propõe a instalação de medidores de tensão e/ou corrente em pontos específicos do alimentador (URIARTE, 2003; ZHOU et al., 2012; SANTOS et al., 2013b; HOSSAIN, ZHU e OVERBYE, 2014; MILIOUDIS, ANDREOU e LABRIDIS, 2015; VIANA, ARAUJO e PENIDO, 2016). As medições realizadas por esses equipamentos são manipuladas e comparadas, entre si e com as medições da subestação, para detectar e identificar o local em que ocorreu a FAI. Apesar dessas metodologias serem promissoras e apresentarem bons resultados, ainda estão longe da realidade da maioria das concessionárias devido ao alto custo de implementação.

Os algoritmos com base no cálculo da impedância aparente possuem a vantagem de, normalmente, não necessitarem da instalação de nenhum equipamento adicional no alimentador, utilizar baixa frequência de amostragem e simplicidade de implementação. Devido a essas características, essa metodologia possui um baixo custo de implementação e também tem sido estudada para localização de FAI (IURINIC, OROZCO e BRETAS, 2015). Esses algoritmos tem a desvantagem da múltipla estimativa, ou seja, para uma determinada falta, o algoritmo poderá obter como resposta dois, ou mais, prováveis locais de falta. Outra desvantagem dos métodos que se baseiam na impedância é o fato de serem função da tensão no ponto de falta. Esse parâmetro não é medido diretamente pelo relé da subestação e, por isso, precisa ser estimado.

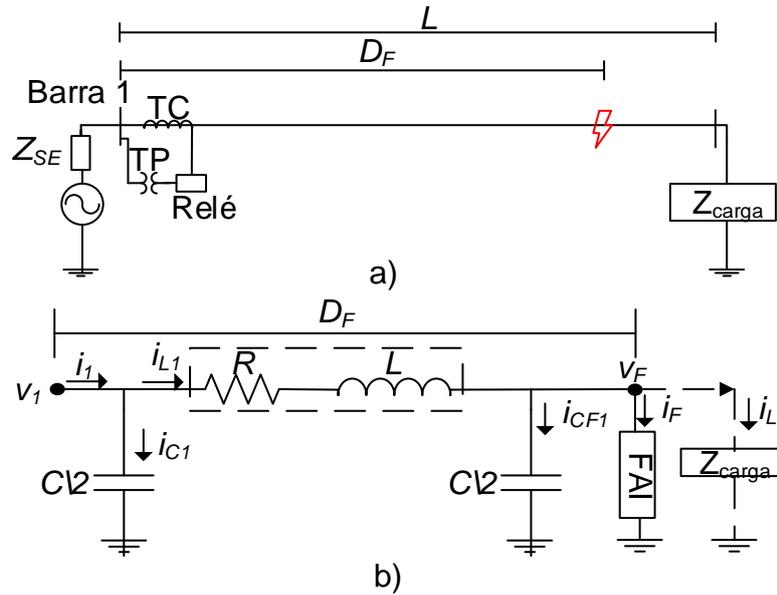
### 3.4 MÉTODO DE IURINIC, OROZCO E BRETAS (2015)

O método de Iurinic, Orozco e Bretas (2015) para localização de FAIs será apresentado em maiores detalhes, pois esse será utilizado, no Capítulo 5, em uma análise comparativa de desempenho com o método proposto nesse trabalho. Apesar de existirem outros métodos na literatura que também apresentam bom desempenho, esses não contêm informações que permitam uma reprodução fiel dos resultados como, por exemplo, os métodos com base em RNAs que utilizam treinamento *offline*. Além disso, os métodos que utilizam medições em mais de um terminal ou altas frequências de amostragem, normalmente possuem vantagens de desempenho quando comparadas a métodos que utilizam medições em um terminal e frequência de amostragem inferiores. Entretanto, a implementação desses métodos ainda é inviável a realidade das concessionárias devido ao alto investimento necessário. Sendo assim, Iurinic, Orozco e Bretas (2015) foi selecionado para o estudo comparativo, pois possui características similares às do método proposto nesse trabalho como, por exemplo, ambos são fundamentados na impedância aparente, utilizam medições em apenas um terminal, não necessitam de treinamento prévio, e utilizam frequência de amostragem compatível com os relés atuais.

Uma das dificuldades dos métodos com base na impedância é a necessidade de se estimar a tensão no ponto de falta. Para isso, o método proposto por Iurinic, Orozco e Bretas (2015) equaciona a tensão no ponto de falta através de um modelo de FAI com dois diodos em antiparalelo. Esse equacionamento é utilizado para modelar o comportamento de um alimentador durante uma FAI em função da distância de incidência da falta. Por fim, os parâmetros desconhecidos das equações propostas por Iurinic, Orozco e Bretas (2015) são estimados através do ajuste por mínimos quadrados.

Sendo assim, considere o sistema monofásico da Figura 3.1 e o modelo de linha  $\pi$  nominal da Figura 3.1b utilizado para representar o trecho entre o ponto de instalação do relé e o local de falta. Aplicando as leis de Kirchhoff ao modelo  $\pi$  é possível escrever a equação (3.1), onde o apóstrofe sobre o sinal significa a derivada primeira do sinal em função do tempo.

Figura 3.1 - Sistema monofásico com FAI no ponto F e modelo de linha  $\pi$



Fonte: Adaptador de Iurinic, Orozco e Bretas (2015)

$$v_1(t) = D_F(Ri_{L1}(t) + L \cdot i_{L1}(t)') + v_F(t) \tag{3.1}$$

O seguinte passo consiste em escrever a equação (3.1) em função da corrente  $i_1$  que é efetivamente medida no terminal 1. Para isso, calcula-se primeiramente a corrente no ramo capacitivo através da equação (3.2).

$$i_{c1}(t) = \frac{1}{2} D_F C v_1(t)' \tag{3.2}$$

Assim, aplicando a Lei das Correntes de Kirchhoff, a corrente  $i_{L1}$  pode ser escrita conforme a equação (3.3).

$$i_{L1}(t) = i_1(t) - \frac{1}{2} D_F C v_1(t) \tag{3.3}$$

Por fim, substitui-se a equação (3.3) em (3.1) obtendo (3.4).

$$v_1(t) = D_F R [i_1(t) - \frac{1}{2} D_F C v_1(t)] + D_F L [i_1(t)' - \frac{1}{2} D_F C v_1(t)''] + v_F(t) \tag{3.4}$$

Onde:

$v_1$  é a tensão instantânea no terminal 1 (V);

$i_1$  é a corrente instantânea no terminal 1 (A);

$i_{L1}$  é a corrente instantânea no ramo série da linha;

$i_{c1}$  é a corrente capacitiva no terminal 1 (A);

$v_F$  é a tensão no ponto de falta (V);

$i_F$  é a corrente no ponto de falta;

$D_F$  é a distância do terminal 1 até a falta (m);

$R$  é a resistência série da linha por unidade de comprimento ( $\Omega/m$ );

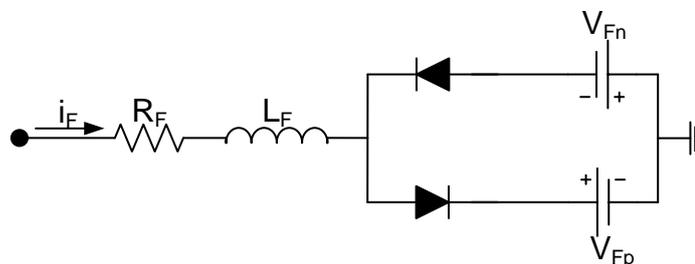
$L$  é a indutância série da linha por unidade de comprimento (H/m);

$C$  é a capacitância paralela por unidade de comprimento (F/m).

A equação (3.4) é escrita em função da tensão no ponto de falta  $v_F$ . Para estimar essa variável, Iurinic, Orozco e Bretas (2015) propõe um equacionamento a partir do modelo proposto por Emanuel et al. (1990) para simulação de FAIs. Esse modelo foi detalhado no Capítulo 2 e é novamente apresentado na Figura 3.2.

Dessa maneira, com base na Figura 3.2 a tensão no ponto de falta pode ser escrita em função da corrente  $i_F$  conforme a equação (3.5). Como pode ser observado na Figura 3.2, as duas tensões são representadas por fontes de tensão contínuas que são ativadas e desativadas mediante diodos, conforme o sentido da corrente de falta. Esses diodos podem ser representados pelas equações (3.6) e (3.7).

Figura 3.2 - Modelo proposto por Emanuel et al. (1990) para simulação de FAI



Fonte: Adaptado de Emanuel et al. (1990)

$$v_F(t) = R_F \cdot i_F(t) + L_F \cdot \dot{i}_F(t) + V_{Fp} \cdot \text{sgp}(i_F) + V_{Fn} \cdot \text{sgn}(i_F) \quad (3.5)$$

$$\text{sgp}(i_F) = \begin{cases} 1, & i_F > 0 \\ 0, & i_F \leq 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

$$\text{sgn}(i_F) = \begin{cases} 0, & i_F \geq 0 \\ -1, & i_F < 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

Onde:

$R_F$  é a componente resistiva da falta;

$L_F$  é a componente indutiva da falta;

$V_{Fp}$  é a tensão de arco positiva;

$V_{Fn}$  é a tensão de arco negativa.

Definida a equação (3.5) para a tensão no ponto de falta, essa pode ser substituída na equação (3.4), obtendo-se a equação (3.8).

$$\begin{aligned} v_1(t) = D_F[Ri_1(t) + Li_1(t)'] + R_F i_F(t) + L_F i_F(t)' + V_{Fp} \text{sgp}(i_F) + \\ V_{Fn} \text{sgn}(i_F) - \frac{1}{2} D_F^2 [RCv_1(t)' + LCv_1(t)'''] \end{aligned} \quad (3.8)$$

A equação (3.8) pode ser reescrita conforme a equação (3.9).

$$v_1(t) = \begin{bmatrix} D_F & R_F & L_F & V_{Fp} & V_{Fn} & D_F^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_s(t) & i_F(t) & i_F(t)' & \text{sgp}(i_F) & \text{sgn}(i_F) & v_{sh}(t) \end{bmatrix}^T \quad (3.9)$$

Onde:

$$v_s(t) = Ri_1(t) + Li_1(t)' \quad (3.10)$$

$$v_{sh}(t) = -\frac{1}{2} [RCv_1(t)' + LCv_1(t)'''] \quad (3.11)$$

O termo quadrático da distância de falta ( $D_F^2$ ) presente na equação (3.9) leva a uma relação não linear entre os termos dessa equação o que, por sua vez, aumenta a complexidade da estimação dos parâmetros desconhecidos. Para contornar esse

problema, Iurinic, Orozco e Bretas (2015) sugere que a capacitância da linha seja desconsiderada, tornando o termo  $v_{sh}$  igual a zero e conseqüentemente excluindo  $D_F^2$  da equação (3.9). Iurinic, Orozco e Bretas (2015) também sugeriu uma solução para a equação (3.9), mantendo a componente capacitiva, através do Método de Newton. Entretanto, segundo o autor, os testes realizados indicaram que a consideração da capacitância da linha não alterou a precisão do método.

Sendo assim, realizando a transposta da equação (3.9) e amostrando os sinais de tensão e corrente com uma taxa de 256 amostras por ciclo, a equação (3.12) pode ser escrita para um número de  $N$  amostras.

$$\begin{bmatrix} v_1(m) \\ v_1(m+1) \\ \vdots \\ v_1(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_s(m) & i_F(m) & i'_F(m) & sgp(i_{F(m)}) & sgn(i_{F(m)}) \\ v_s(m+1) & i_F(m+1) & i'_F(m+1) & sgp(i_{F(m+1)}) & sgn(i_{F(m+1)}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_s(N) & i_F(N) & i'_F(N) & sgp(i_{F(N)}) & sgn(i_{F(N)}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} D_F \\ R_F \\ L_F \\ V_{Fp} \\ V_{Fn} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Para determinar os valores dos parâmetros desconhecidos da equação (3.12), Iurinic, Orozco e Bretas (2015) propõe a utilização de um estimador de mínimos quadrados através da equação (3.13).

$$\hat{\theta} = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (3.13)$$

Onde:

$\hat{\theta}$  é o vetor dos parâmetros a serem estimados;

$y$  é o vetor de amostras  $v_1$ ;

$X$  é a matriz de regressores.

As equações apresentadas até o momento para o método proposto por Iurinic, Orozco e Bretas (2015), foram desenvolvidas para um sistema monofásico. No entanto, o mesmo raciocínio pode ser realizado para um sistema trifásico, entretanto as seguintes substituições devem ser realizadas:

$$v_1(m) = [v_a(m) \quad v_b(m) \quad v_c(m)]^T \quad (3.14)$$

$$i_1(m) = [i_a(m) \quad i_b(m) \quad i_c(m)]^T \quad (3.15)$$

$$i_F(m) = [i_{Fa}(m) \quad i_{Fb}(m) \quad i_{Fc}(m)]^T \quad (3.16)$$

$$v_s(m) = [v_{sa}(m) \quad v_{sb}(m) \quad v_{sc}(m)]^T \quad (3.17)$$

$$R_F = \begin{bmatrix} R_{Fa} & 0 & 0 \\ 0 & R_{Fb} & 0 \\ 0 & 0 & R_{Fc} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$L_F = \begin{bmatrix} L_{Fa} & 0 & 0 \\ 0 & L_{Fb} & 0 \\ 0 & 0 & L_{Fc} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$V_{Fp} = \begin{bmatrix} V_{Fpa} & 0 & 0 \\ 0 & V_{Fpb} & 0 \\ 0 & 0 & V_{Fpc} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$V_{Fn} = \begin{bmatrix} V_{Fna} & 0 & 0 \\ 0 & V_{Fnb} & 0 \\ 0 & 0 & V_{Fnc} \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

$$D_F = \begin{bmatrix} D_F & 0 & 0 \\ 0 & D_F & 0 \\ 0 & 0 & D_F \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Entre os aspectos inovadores do método proposto por Iurinic, Orozco e Bretas (2015), pode-se destacar a utilização de medições em apenas um terminal e o fato de

não ter seu desempenho influenciado pelo instante de incidência da FAI nem pela característica desbalanceada da rede. Além disso, quando comparado ao método de Djuric, Radojevic e Terzija (1997), o método de Iurinic, Orozco e Bretas (2015) obteve melhores resultados.

Apesar do aspecto inovador, o método proposto por Iurinic, Orozco e Bretas (2015) utiliza em seu equacionamento o modelo de FAI proposto por Emanuel et al. (1990). Esse modelo, foi proposto para representar as características de uma FAI em um solo arenoso. Devido a isso, as curvas  $V \times I$  geradas por FAIs em outros tipos de solos não são representadas de forma adequada por esse modelo. Assim, espera-se que o método proposto por Iurinic, Orozco e Bretas (2015) apresente limitações quando utilizado para localizar FAIs que incidirem em outros tipos de solos.

### 3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo apresentou as diferentes metodologias propostas na literatura para localização de faltas de baixa e alta impedância em redes de distribuição. Através dessa revisão, pode-se observar que os diferentes métodos possuem certas vantagens, entretanto ainda possuem limitações, principalmente no que diz respeito a FAIs. A maior parte dos métodos exigem algum treinamento prévio, altas taxas de amostragem ou, ainda, a instalação de medidores extras ao longo do alimentador. Além disso, métodos com base na impedância, consideram FAIs em apenas um tipo de superfície, limitando sua aplicação em alimentadores reais.

Sendo assim, pode-se perceber que ainda existem lacunas nos métodos propostos até o momento. Dessa forma, é de grande valia o desenvolvimento de um algoritmo que considere a incidência de FAIs em diversos tipos de superfícies, não necessite de ajustes prévios (treinamento), utilize as medições de tensão e corrente já realizadas na subestação, além de uma frequência de amostragem compatível com os relés atuais.



## 4 PROPOSTA DA TESE

### 4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Este capítulo apresenta a metodologia proposta para estimação da distância de curtos-circuitos de alta impedância em sistemas de distribuição. A metodologia envolve o desenvolvimento de equações que modelam o comportamento do alimentador, durante uma FAI, em função da distância em que o curto-circuito ocorreu e da tensão no ponto de falta.

Para estimar a tensão no ponto de falta, é proposto um único modelo capaz de representar as diferentes curvas  $V \times I$  geradas durante a incidência de FAIs para os diferentes tipos de solos.

Os parâmetros desconhecidos das equações, inclusive a distância de falta, são estimados através de uma RNA cujo treinamento é realizado de forma contínua e somente após o início da FAI. Dessa maneira, a RNA não necessita de treinamento prévio e, por consequência, não é necessário a simulação de inúmeros casos para realizar esse treinamento.

Além disso, o método utiliza apenas os dados instantâneos de tensão e corrente medidos pelos relés instalados na subestação, sendo que esses dados são adquiridos em uma frequência de amostragem de 3,84 kHz. Essas características tornam o método uma alternativa de baixo custo para localização de faltas, pois pode ser implementado em um computador junto a subestação ou ao centro de operações.

### 4.2 TENSÃO NO PONTO DE FALTA

Em grande parte, os algoritmos propostos na literatura para localização de curtos-circuitos em redes de distribuição partem da premissa que a relação  $V \times I$  no ponto de falta é linear, ou seja, a resistência de falta é constante. Essa consideração limita a aplicação prática desses algoritmos, pois, normalmente, as faltas geram arcos elétricos o que ocasiona um comportamento não linear na relação  $V \times I$  no ponto de falta. Esse comportamento é mais evidente em faltas de alta impedância. A modelagem dessa característica não linear não é trivial, principalmente devido ao fato de que cada tipo de solo possui uma diferente curva  $V \times I$  durante a FAI.

O modelo para simular as FAIs utilizado nesse trabalho foi inicialmente proposto por Nan et al. (2001) e aprimorado por Santos et al. (2013a). Esse modelo consiste em duas resistências variáveis em série,  $R_1$  e  $R_2$ , responsáveis, respectivamente, pela fase de *buildup* e pela assimetria da relação  $V \times I$  no ponto de falta. Esse modelo foi escolhido, pois FAIs envolvendo diferentes tipos de solos podem ser simuladas apenas alterando a curva  $V \times I$  implementada no controle de  $R_2$ .

Sendo assim, considerando o modelo aprimorado de Santos et al. (2013a) e a Figura 4.1, a tensão no ponto de falta ( $v_F$ ) durante uma FAI é dada pela equação (4.1).

$$v_F(t) = v_{R_1}(t) + v_{R_2}(t) \quad (4.1)$$

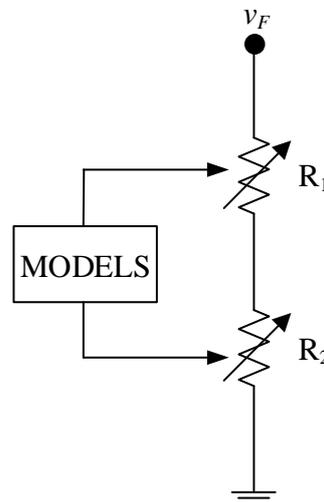
Onde:

$v_F(t)$  é a tensão instantânea no ponto de falta;

$v_{R_1}(t)$  é a tensão instantânea no resistor  $R_1$ ;

$v_{R_2}(t)$  é a tensão instantânea no resistor  $R_2$ .

Figura 4.1 - Modelo para faltas de alta impedância



Fonte: Adaptado de Nan et al. (2001)

#### 4.2.1 Tensão em $R_1$

A resistência  $R_1$ , responsável pela etapa de *buildup*, possui um valor elevado no início da falta e diminui gradativamente até um valor próximo a zero. Devido ao fato

desse período ser transitório, uma maneira de simplificar o desenvolvimento de um método para localização de FAI é aguardar o fim desse período. Dessa maneira, pode-se considerar que a tensão no ponto de falta irá depender exclusivamente de  $R_2$ .

O período de *buildup* depende de diversos fatores como tipo de solo, umidade e classe de tensão do alimentador. Devido ao fato da duração da etapa de *buildup* ser variável, o algoritmo proposto utiliza as equações (4.2) e (4.3) para detectar o fim dessa etapa. As equações (4.2) e (4.3) verificam se a diferença entre o valor de pico de três ciclos consecutivos é inferior a 10%. Se essas equações forem verdadeiras, pode-se considerar que a amplitude da corrente da fase em falta parou de crescer. Além disso, o algoritmo verifica se o período de *buildup* possui, no mínimo, trinta ciclos. Essa condição tem como base os estudos realizados por Nan et al. (2001), Santos et al. (2013a) e Ferraz et al. (2016) os quais mencionam que a duração do período de *buildup* é de, aproximadamente, trinta ciclos. Essa condição é necessária devido a presença de *shoulders* que podem ser confundidos com o fim da etapa de *buildup* caso apenas as equações (4.2) e (4.3) forem utilizadas.

Sendo assim, se o período de buildup tiver duração superior a trinta ciclos e as equações (4.2) e (4.3) foram verdadeiras, pode-se considerar que o período de *buildup* terminou.

A figura 4.2 apresenta de forma gráfica os pontos das equações (4.2) e (4.3).

$$i_{pico}(t) - i_{pico}(t - T) \leq \varepsilon_1 \quad (4.2)$$

$$i_{pico}(t - T) - i_{pico}(t - 2T) \leq \varepsilon_1 \quad (4.3)$$

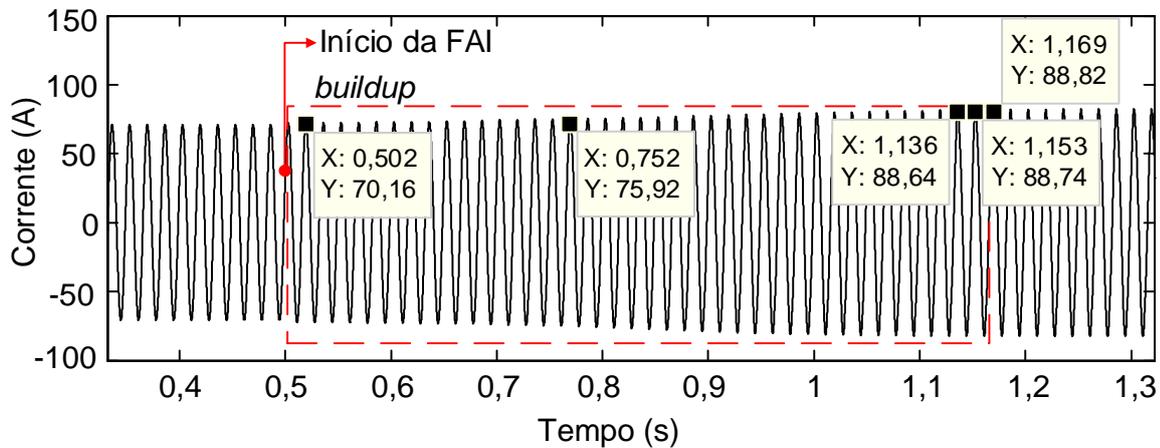
Onde:

$\varepsilon_1$  é a diferença entre dois valores de pico consecutivos ( $\varepsilon_1 = 0,1$ );

$T$  é o período (1/60Hz);

$i_{pico}$  é a corrente de pico da fase em falta medida na subestação.

Figura 4.2 - Corrente na fase em falta. Detalhe dos pontos utilizados no critério de detecção do fim da etapa de *buildup*



Fonte: O autor

#### 4.2.2 Tensão em $R_2$

A resistência  $R_2$  é responsável por reproduzir a distorção e a assimetria da curva  $V \times I$  no ponto de falta devido a presença do arco elétrico. Para isso, uma rotina calcula o valor de  $R_2$  através da tensão no ponto de falta e dos dados da curva  $V \times I$  da superfície em que se está simulando a FAI.

As diferentes curvas  $V \times I$  utilizadas nesse trabalho são aquelas apresentadas na Figura 2.7. Essas curvas foram obtidas através de testes em campo realizados por Santos et al. (2013a). Como pode ser observado, o tipo de solo influencia diretamente o comportamento dessas curvas tanto em amplitude como em assimetria. De modo geral, os métodos propostos para localização de FAIs consideram apenas um tipo de curva  $V \times I$  em seus estudos ou, ainda, consideram a FAI como uma resistência linear de valor elevado (FANUCCHI, 2014; HONG e HUANG, 2014; ALI et al. 2014; MILIOUDIS, ANDREOU e LABRIDIS, 2015; IURINIC, OROZCO e BRETAS, 2015; VIANA, ARAÚJO e PENIDO, 2016). Esse fator limita suas aplicações práticas, já que as FAIs possuem características assimétricas e podem ocorrer em qualquer tipo de solo. Além disso, esses métodos não identificam o tipo de superfície em que a FAI ocorreu para que um algoritmo específico para aquela superfície seja selecionado.

Sendo assim, uma das inovações desse trabalho está na proposição de uma única função matemática capaz de representar as curvas  $V \times I$  dos diferentes tipos de solo. Dessa maneira, não é necessário conhecer o tipo de superfície em que a FAI ocorreu para que a sua distância seja estimada.

Para definição dessa função, foram testados polinômios de ordem quatro a nove, conforme a equação (4.4), de modo a aproximar as curvas V x I dos diferentes tipos de solos. Devido a diferença de amplitude entre os semiciclos positivos e negativos da tensão e da corrente no ponto de falta, típico das FAIs (EMANUEL et al., 1990), as curvas V x I foram separadas em duas partes. Uma para o semiciclo positivo da tensão no ponto de falta e outra para o semiciclo negativo. Apesar de existirem outras funções matemáticas capazes de aproximar as curvas V x I, os polinômios utilizam métodos de ajuste de curvas mais simples o que reduz a carga computacional.

$$v_{Fi}(m) = c_k \cdot i_{Fi}(m)^k + c_{k-1} \cdot i_{Fi}(m)^{k-1} + \dots + c_1 \cdot i_{Fi}(m) + c_0, \quad 4 \leq k \leq 9 \quad (4.4)$$

Onde:

$v_{Fi}$  é o valor da tensão na curva V x I (valor real);

$c$  são os coeficientes do polinômio;

$i_{Fi}$  é o valor da corrente na curva V x I (valor real);

$k$  é o grau do polinômio e índice de cada coeficiente;

$m$  é o índice referente a posição da amostra.

O cálculo dos coeficientes dos polinômios foi realizado através da função *polyfit* do software Matlab®. Essa função retorna os coeficientes de um polinômio de grau  $k$  que gera o menor erro quadrático para a janela de dados utilizada. Para isso, a função *polyfit* organiza os valores da equação (4.4) conforme a equação (4.5). Nessa equação, os índices  $m$  e  $N$  representam as amostras iniciais e finais da janela de dados utilizada. Por fim, os coeficientes  $c$  são obtidos através do uso de uma matriz pseudo inversa conforme a equação (4.6).

$$\begin{bmatrix} v_F(m) \\ v_F(m+1) \\ \vdots \\ v_F(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_F(m)^{k+1} & i_F(m)^k & \dots & 1 \\ i_F(m+1)^{k+1} & i_F(m+1)^k & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 1 \\ i_F(N)^{k+1} & i_F(N)^k & \dots & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_k \\ c_{k-1} \\ \vdots \\ c_0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$c = (M^T M)^{-1} M^T v_F \quad (4.6)$$

Além disso, o desempenho de cada polinômio foi avaliado através do erro quadrático relativo ( $SQ^2$ ). Esse coeficiente é uma medida da capacidade que um modelo possui de representar um determinado conjunto de dados. É definido como sendo 1 (um) menos a relação entre a soma dos quadrados residuais (SSE) e a soma dos erros quadráticos relativos à média do sinal medido (SST), de acordo com as equações (4.7), (4.8) e (4.9). Dessa forma,  $SQ^2$  pode variar conforme o intervalo  $0 \leq SQ^2 \leq 1$ , sendo que a qualidade da aproximação será melhor quanto mais próximo de 1 estiver  $SQ^2$ .

$$SSE = \sum_{m=1}^D (\hat{v}_{F_i}(m) - v_{F_i}(m))^2 \quad (4.7)$$

$$SST = \sum_{m=1}^D (v_{F_i}(m) - \bar{v}_{F_i})^2 \quad (4.8)$$

$$SQ^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (4.9)$$

Onde:

$SSE$  é a soma dos quadrados residuais;

$SST$  é a soma dos quadrados relativos a média;

$\hat{v}_{F_i}$  é o valor estimado para tensão através dos polinômios;

$\bar{v}_{F_i}$  é o valor médio das tensões da curva  $V \times I$  ( $v_{F_i}$ );

$SQ^2$  é o erro quadrático relativo;

$D$  é o total de amostras da janela considerada.

A Tabela 4.1 apresenta  $SQ^2$  dos polinômios testados de diferentes ordens. Nessa tabela, os dados da coluna  $P$  representam o  $SQ^2$  referente aos polinômios utilizados para aproximar o semiciclo positivo da tensão no ponto de falta. Enquanto as colunas  $N$  representam  $SQ^2$  referente aos polinômios do semiciclo negativo. Além disso, em vermelho estão as melhores aproximações ( $SQ^2$  mais próximo de 1) do semiciclo positivo de cada tipo de solo quando comparado as diferentes ordens dos

polinômios. Enquanto em azul estão as melhores aproximações para o semiciclo negativo.

Como pode ser observado na Tabela 4.1, não existe um polinômio de uma única ordem que apresente os maiores  $SQ^2$  em todos os tipos de solos e nos semiciclos positivo e negativos. Por exemplo, para o solo do tipo areia, o polinômio que melhor aproximou o semiciclo positivo da curva  $V \times I$  foi o de sétima ordem. Entretanto, o semiciclo negativo, desse mesmo solo, foi melhor aproximado pelo polinômio de nona ordem. Já os semiciclos positivo e negativo do solo tipo asfalto, foram melhores aproximados pelo polinômio de quinta ordem.

Sendo assim, para definir um único polinômio para os diferentes tipos de solos, foi formada a Tabela 4.2. Os valores dessa tabela foram calculados através da diferença entre o  $SQ^2$  obtido pelo polinômio que gerou a melhor aproximação para um determinado tipo de solo ( $SQ_{\max}^2$ ) e o  $SQ^2$  obtido pelas diferentes ordens polinomiais para o mesmo semiciclo e tipo de solo.

Por exemplo, comparando a melhor aproximação ( $SQ_{\max}^2$ ) do semiciclo positivo do solo tipo areia com o  $SQ^2$  do semiciclo positivo do polinômio de quarta ordem para o mesmo tipo de solo, obtém-se:

$$SQ_{dif}^2 = SQ_{\max}^2 - SQ^2 = 0,996 - 0,995 = 0,001$$

Ao final, foi realizada a soma dos módulos dessas diferenças.

Através desse procedimento é possível verificar qual a ordem do polinômio que, independentemente do tipo de solo, obteve no geral o  $SQ^2$  mais próximo das melhores aproximações obtidas. Sendo assim, através dos resultados apresentados na Tabela 4.2, pode-se concluir que o polinômio de sétima ordem é o que melhor modela as curvas  $V \times I$  dos diferentes tipos de solos, pois é o que apresenta as menores somas no semiciclo positivo e negativo.

Sendo assim, com base na equação (4.4), a tensão no semiciclo positivo e negativo do resistor  $R_2$  pode ser calculada através das equações (4.10) e (4.11), respectivamente.

A Figura 4.3 apresenta as curvas  $V \times I$  dos diferentes tipos de solos e as suas respectivas aproximações através do polinômio de sétima ordem.

Cabe ressaltar que o modelo polinomial das equações (4.10) e (4.11) foi proposto a partir das curvas  $V \times I$  das seis superfícies apresentadas na Figura 4.3. O desempenho do modelo para superfícies diferentes das apresentadas nessa figura não foi avaliado, pois não foram encontrados na literatura ensaios realizados para outros superfícies. Entretanto, as curvas  $V \times I$  apresentadas na Figura 4.3 abrangem as principais superfícies em que as FAIs podem incidir.

$$V_{R2p}(m) = c_{7p} \cdot i_{Fp}(m)^7 + c_{6p} \cdot i_{Fp}(m)^6 + c_{5p} \cdot i_{Fp}(m)^5 + c_{4p} \cdot i_{Fp}(m)^4 + c_{3p} \cdot i_{Fp}(m)^3 + c_{2p} \cdot i_{Fp}(m)^2 + c_{1p} \cdot i_{Fp}(m) + c_{0p} \quad (4.10)$$

$$V_{R2n}(m) = c_{7n} \cdot i_{Fn}(m)^7 + c_{6n} \cdot i_{Fn}(m)^6 + c_{5n} \cdot i_{Fn}(m)^5 + c_{4n} \cdot i_{Fn}(m)^4 + c_{3n} \cdot i_{Fn}(m)^3 + c_{2n} \cdot i_{Fn}(m)^2 + c_{1n} \cdot i_{Fn}(m) + c_{0n} \quad (4.11)$$

Tabela 4.1 -  $SQ^2$  calculado para cada ordem de polinômio para os diferentes tipos de solos

Tipo de Solo	Ordem do Polinômio											
	4°		5°		6°		7°		8°		9°	
	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N
	$SQ^2$											
Areia	0,995	0,990	0,995	0,990	0,995	0,991	0,996	0,992	0,995	0,992	0,995	0,993
Asfalto	0,869	0,876	0,869	0,883	0,865	0,874	0,860	0,870	0,853	0,869	0,847	0,872
Cascalho	0,919	0,975	0,923	0,979	0,922	0,978	0,924	0,977	0,925	0,976	0,926	0,974
Grama	0,995	0,994	0,994	0,994	0,994	0,994	0,994	0,994	0,994	0,994	0,994	0,993
Paralelepípedo	0,995	0,993	0,995	0,993	0,995	0,993	0,995	0,993	0,994	0,994	0,995	0,993
Solo Local	0,894	0,901	0,926	0,932	0,948	0,946	0,963	0,952	0,966	0,952	0,964	0,949

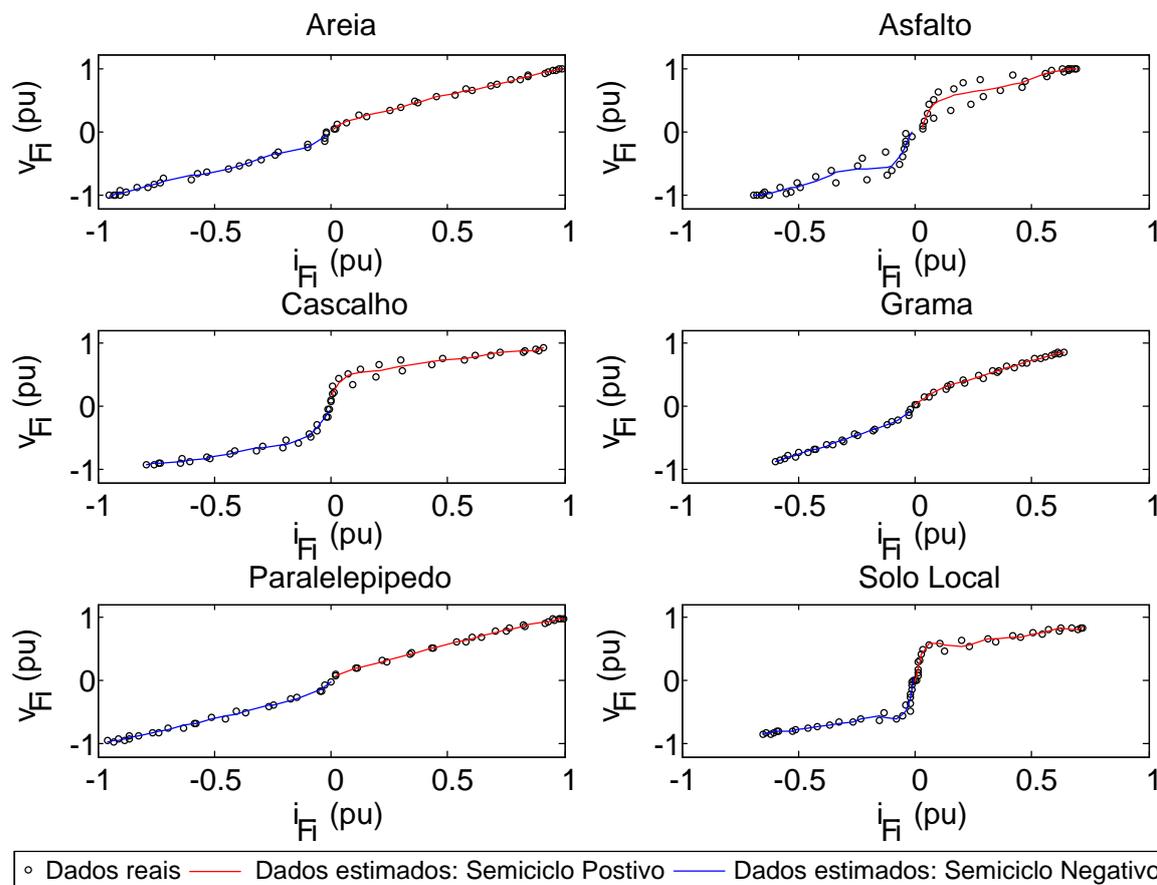
Fonte: O autor

Tabela 4.2 - Diferença entre  $SQ^2$  calculado para cada ordem polinomial e o maior  $SQ^2$  obtido em cada tipo de solo

Tipo de Solo	$SQ^2_{max}$		Ordem do Polinômio											
			4°		5°		6°		7°		8°		9°	
	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N
	$SQ^2_{dif}$													
Areia	0,996	0,993	0,001	0,003	0,001	0,003	0,001	0,002	0	0,001	0,001	0,001	0,001	0
Asfalto	0,869	0,883	0	0,007	0	0	0,004	0,009	0,009	0,013	0,016	0,014	0,022	0,011
Cascalho	0,926	0,979	0,007	0,004	0,003	0	0,004	0,001	0,002	0,002	0,001	0,003	0	0,005
Grama	0,995	0,994	0	0	0,001	0	0,001	0	0,001	0	0,001	0	0,001	0,001
Paralelepípedo	0,995	0,994	0	0,001	0	0,001	0	0,001	0	0,001	0,001	0	0	0,001
Solo Local	0,966	0,952	0,072	0,051	0,040	0,020	0,018	0,006	0,003	0	0	0	0,002	0,003
<b>Soma</b>			0,080	0,066	0,045	0,024	0,028	0,019	0,015	0,017	0,020	0,018	0,026	0,021

Fonte: O autor

Figura 4.3 - Curvas  $V \times I$  no ponto de falta para diferentes solos e suas respectivas aproximações através de polinômio de sétima ordem

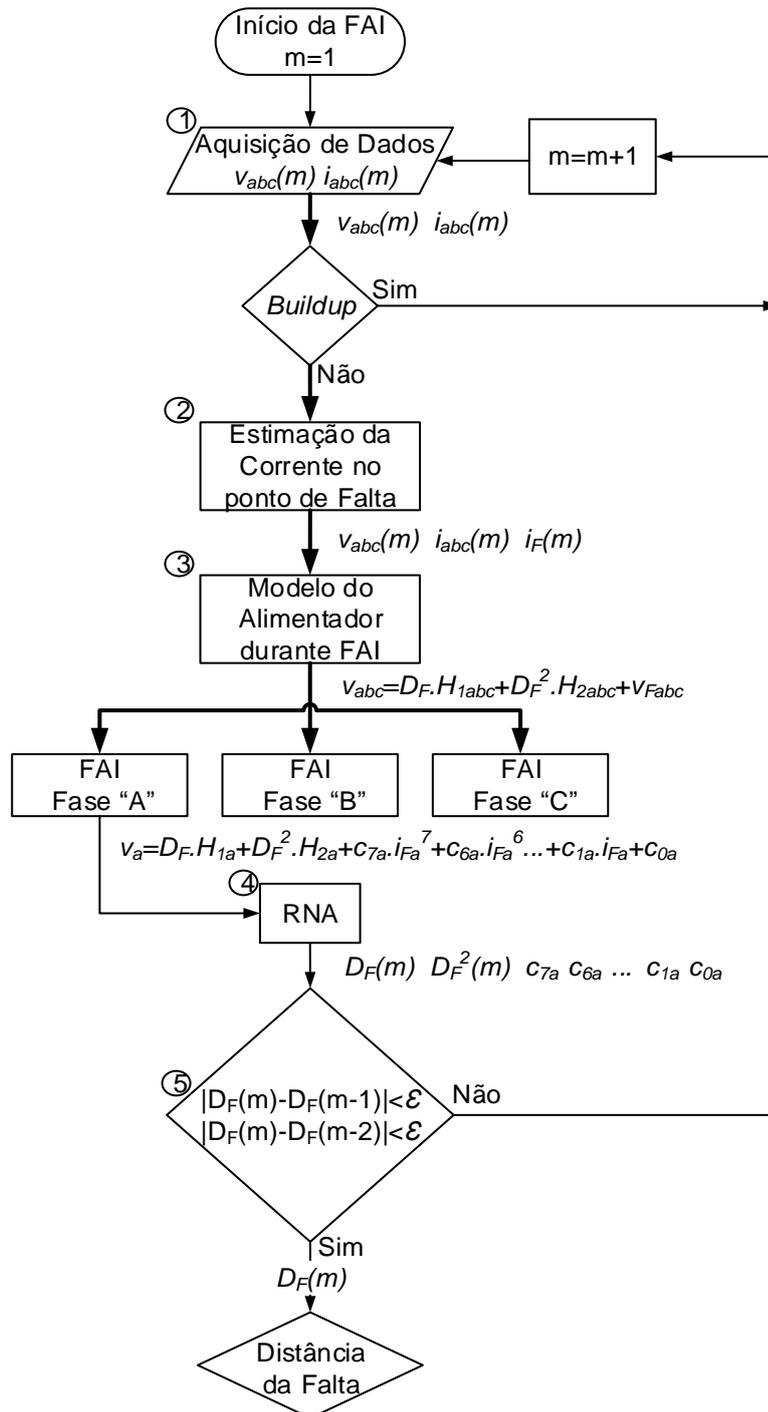


Fonte: O autor

### 4.3 MÉTODO PROPOSTO PARA LOCALIZAÇÃO DE FAI

A estrutura geral do método proposto para localização de FAIs é apresentada no fluxograma da Figura 4.4. As setas de maior espessura indicam sinais trifásicos ou matrizes e as setas de menor espessura indicam sinais monofásicos ou vetores. A seguir serão descritas as funções e características dos cinco principais blocos desse fluxograma.

Figura 4.4 - Fluxograma geral do método proposto para localização de FAI em redes de distribuição



Fonte: O autor

#### 4.3.1 Bloco 1: Aquisição de dados

Os dados de entrada necessários para o algoritmo proposto são os parâmetros da rede (impedâncias série e capacitâncias em paralelo) e os valores instantâneos de

tensão e corrente. Os parâmetros da rede são adquiridos diretamente do banco de dados da concessionária e são atualizados sempre que ocorrer alguma alteração na topologia da rede. Assim, o algoritmo será executado sempre com a configuração mais atual.

Os valores instantâneos de tensão e corrente são adquiridos pelos relés instalados nas subestações em uma frequência de amostragem de 3,84 kHz (64 amostras por ciclo).

#### 4.3.2 Bloco 2: Estimação da corrente no ponto de falta

O modelo proposto para tensão no ponto de falta, através das equações (4.10) e (4.11), possui  $i_F$  como variável independente. Esse parâmetro não é diretamente medido no local de falta e, por isso, deve ser estimado através de medições existentes na subestação.

Devido ao fato das FAIs gerarem baixas correntes em comparação com as correntes de carga, pode-se assumir que a corrente de carga não é significativamente modificada pela ocorrência da falta. Assim, considera-se que a corrente pré-falta é próxima da corrente de carga durante a falta. Dessa maneira, uma aproximação razoável para  $i_F$  pode ser feita através da equação (4.12), onde a corrente no ponto de falta é calculada através da diferença entre a corrente de falta e a pré-falta.

Como os sinais são considerados no domínio do tempo, a equação (4.12) deve ser aplicada entre amostras de mesmo índice, ou seja, deve existir um número inteiro de ciclos entre as amostras. Devido a isso, o sincronismo entre as amostras é realizado através de um detector de passagem por zero aplicado ao sinal de tensão da fase em falta medido na subestação. Para obtenção da primeira amostra do período pré-falta, o detector é aplicado com um atraso de três ciclos em relação ao início da FAI. Já para obtenção da primeira amostra durante a falta, o detector é aplicado após a etapa de *buildup*. Esse procedimento é exemplificado na Figura 4.5.

$$i_F(t_i) = i(t_i) - i(t_i - b.T) \quad (4.12)$$

Onde:

$i_F$  é a corrente instantânea no ponto de falta;

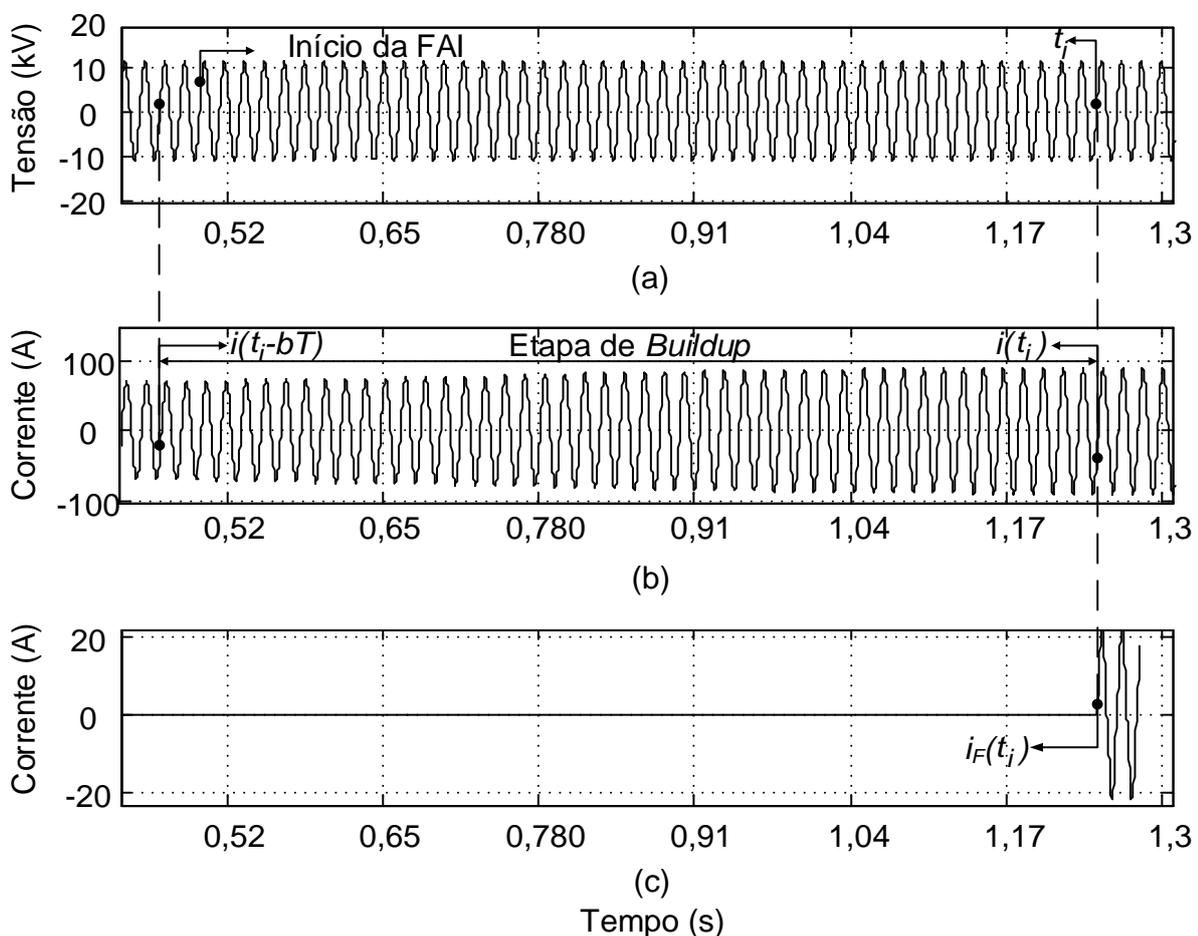
$i$  é a corrente instantânea medida no relé;

$t_i$  é o instante de tempo da primeira amostra do semiciclo positivo da tensão da fase em falta após a etapa de *buildup*;

$b$  é um número randômico de períodos;

$T$  é o período (1/60Hz).

Figura 4.5 - Estimação de corrente de falta. (a) Tensão na fase em falta medida na subestação; (b) Corrente na fase em falta medida na subestação; (c) Corrente estimada no ponto de falta.



Fonte: O autor

### 4.3.3 Bloco 3: Modelo do alimentador durante FAIs

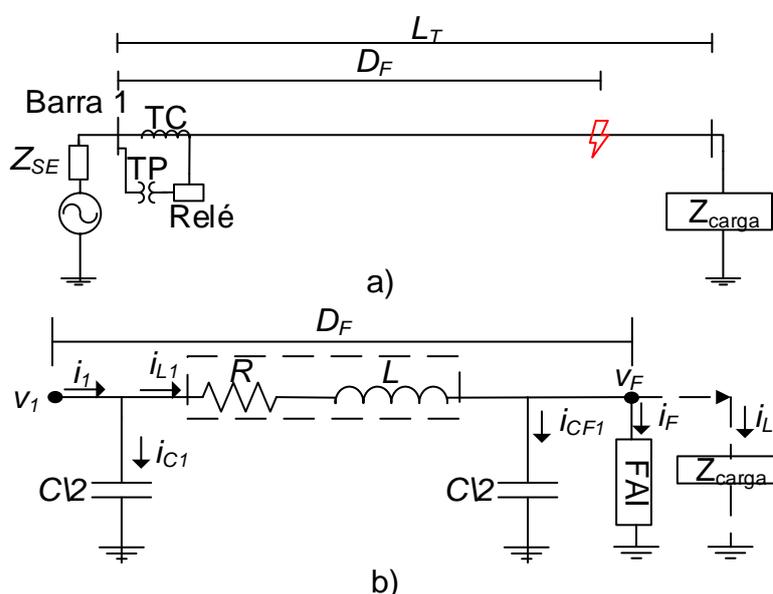
O objetivo desta seção é apresentar um modelo para o sistema de distribuição que represente o comportamento da rede durante uma FAI. A metodologia apresentada a seguir, tem como base a utilizada em Iurinic, Orozco e Bretas (2015),

a qual foi descrita na seção 3.4. Algumas etapas do desenvolvimento das equações serão repetidas afim de tornar claro todo desenvolvimento do método proposto.

A Figura 4.6a apresenta o diagrama unifilar simplificado de um sistema de distribuição durante um curto-circuito. Esse modelo é uma simplificação, pois considera que, após o início da falta, toda a carga do alimentador está alocada a jusante do ponto de falta. Apesar dessa aproximação acrescentar certo erro na localização de faltas, ela permite que não seja necessária a instalação de equipamentos adicionais de medição ao longo do alimentador, pois não são necessárias informações de corrente e tensão nas cargas em derivação. Sendo assim,  $Z_{SE}$  é a impedância equivalente do sistema,  $L_T$  é o comprimento total do alimentador,  $D_F$  é a distância do local onde o relé está instalado e o ponto de falta,  $Z_{carga}$  é a carga total do sistema concentrada após o ponto de falta.

O trecho que conecta o local onde o relé está instalado e o ponto de falta pode ser representado através do modelo  $\pi$  nominal da Figura 4.6b (KERSTING, 2002).

Figura 4.6 - Diagrama unifilar de um sistema de distribuição durante uma falta



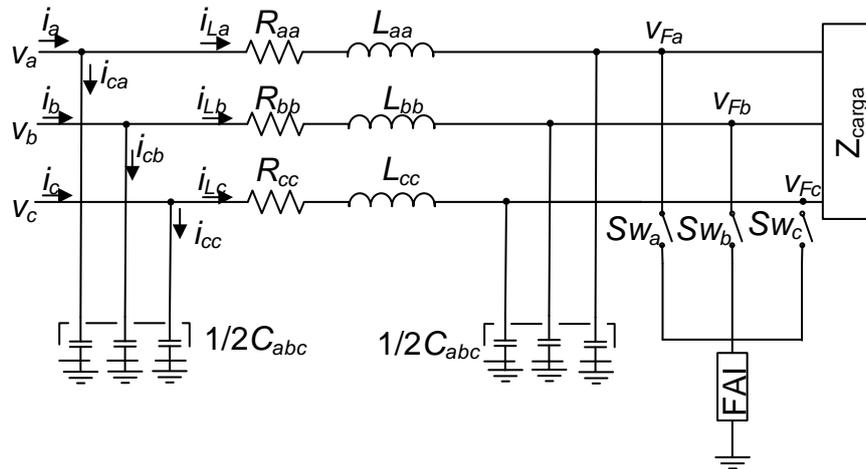
Fonte: Adaptado de Iurinic, Orozco e Bretas (2015)

Conforme descrito na seção 3.4, a tensão instantânea medida no local onde o relé está instalado pode ser calculada pela equação (4.13).

$$v_1(t) = D_F R (i_1(t) - \frac{1}{2} D_F C v_1(t)') + D_F L (i_1(t) - \frac{1}{2} D_F C v_1(t)'') + v_F(t) \quad (4.13)$$

A Figura 4.7 apresenta o equivalente trifásico do modelo da Figura 4.6b. Através desse equivalente, a equação (4.13) pode ser reescrita conforme a equação (4.14).

Figura 4.7 - Modelo trifásico do sistema de distribuição



Fonte: O autor

$$v_{abc}(t) = D_F \cdot [R_{abc} \cdot i_{abc}(t) + L_{abc} \cdot i_{abc}'(t)] - \frac{1}{2} \cdot D_F^2 [R_{abc} \cdot C_{abc} \cdot v_{abc}'(t) + L_{abc} \cdot C_{abc} \cdot v_{abc}''(t)] + V_{F_{abc}}(t) \quad (4.14)$$

Onde os sinais de tensão e corrente são vetores de dimensão 3 conforme as equações (4.15) e (4.16), respectivamente.

$$v_{abc}(t) = [v_a(t) \quad v_b(t) \quad v_c(t)]^T \quad (4.15)$$

$$i_{abc}(t) = [i_a(t) \quad i_b(t) \quad i_c(t)]^T \quad (4.16)$$

Os parâmetros da rede são matrizes de ordem 3x3 com a seguinte configuração:

$$R_{abc} = \begin{bmatrix} R_{aa} & R_{ab} & R_{ac} \\ R_{ba} & R_{bb} & R_{bc} \\ R_{ca} & R_{cb} & R_{cc} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

$$L_{abc} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ca} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$C_{abc} = \begin{bmatrix} C_{aa} & C_{ab} & C_{ac} \\ C_{ba} & C_{bb} & C_{bc} \\ C_{ca} & C_{cb} & C_{cc} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

A tensão no ponto de falta será um vetor de ordem 3 conforme a equação (4.20).

$$v_{Fabc}(t) = [v_{Fa}(t) \quad v_{Fb}(t) \quad v_{Fc}(t)]^T \quad (4.20)$$

Sendo assim, reescrevendo a equação (4.14) na forma completa, obtém-se a equação (4.21).

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} D_F & 0 & 0 \\ 0 & D_F & 0 \\ 0 & 0 & D_F \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} R_{aa} & R_{ab} & R_{ac} \\ R_{ba} & R_{bb} & R_{bc} \\ R_{ca} & R_{cb} & R_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a'(t) \\ i_b'(t) \\ i_c'(t) \end{bmatrix} \right\} - \\ &\quad \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} D_F^2 & 0 & 0 \\ 0 & D_F^2 & 0 \\ 0 & 0 & D_F^2 \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} R_{aa} & R_{ab} & R_{ac} \\ R_{ba} & R_{bb} & R_{bc} \\ R_{ca} & R_{cb} & R_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_{aa} & C_{ab} & C_{ac} \\ C_{ba} & C_{bb} & C_{bc} \\ C_{ca} & C_{cb} & C_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a'(t) \\ v_b'(t) \\ v_c'(t) \end{bmatrix} + \right. \\ &\quad \left. \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_{aa} & C_{ab} & C_{ac} \\ C_{ba} & C_{bb} & C_{bc} \\ C_{ca} & C_{cb} & C_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a''(t) \\ v_b''(t) \\ v_c''(t) \end{bmatrix} \right\} + \begin{bmatrix} v_{Fa}(t) \\ v_{Fb}(t) \\ v_{Fc}(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.21)$$

A equação (4.21) modela o comportamento de um sistema trifásico durante um curto-circuito. Essa equação possui dois parâmetros desconhecidos: a distância da falta ( $D_F$ ) e a tensão no ponto de falta ( $v_{Fabc}$ ). Os outros parâmetros são conhecidos, ou seja, as tensões e as correntes ( $v_{abc}$  e  $i_{abc}$ ) são medidas nos relés da subestação,

e os parâmetros de rede do alimentador ( $R_{abc}$ ,  $L_{abc}$ ,  $C_{abc}$ ) são informações armazenadas no banco de dados da concessionária.

Na seção 4.2 foi proposto um modelo para a tensão no ponto de falta durante FAIs envolvendo os diferentes tipos de solos. Esse modelo consiste em dois polinômios de sétima ordem. Um polinômio para o semiciclo positivo da tensão no ponto de falta e outro para o semiciclo negativo, conforme as equações (4.10) e (4.11), respectivamente. A fim de simplificar a apresentação do método, apenas o equacionamento referente ao semiciclo positivo da tensão no ponto de falta será descrito no restante desse capítulo. Entretanto, os mesmos procedimentos são aplicáveis aos dados do semiciclo negativo da tensão no ponto de falta.

Sendo assim, substituindo a equação (4.10) em (4.20), obtém-se (4.22).

$$\begin{bmatrix} V_{Fpa} \\ V_{Fpb} \\ V_{Fpc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{7pa} \cdot i_{Fpa}^7 + C_{6pa} \cdot i_{Fpa}^6 + C_{5pa} \cdot i_{Fpa}^5 + C_{4pa} \cdot i_{Fpa}^4 + \\ C_{7pb} \cdot i_{Fpb}^7 + C_{6pb} \cdot i_{Fpb}^6 + C_{5pb} \cdot i_{Fpb}^5 + C_{4pb} \cdot i_{Fpb}^4 + \\ C_{7pc} \cdot i_{Fpc}^7 + C_{6pc} \cdot i_{Fpc}^6 + C_{5pc} \cdot i_{Fpc}^5 + C_{4pc} \cdot i_{Fpc}^4 + \\ C_{3pa} \cdot i_{Fpa}^3 + C_{2pa} \cdot i_{Fpa}^2 + C_{1pa} \cdot i_{Fpa} + C_{0pa} \\ C_{3pb} \cdot i_{Fpb}^3 + C_{2pb} \cdot i_{Fpb}^2 + C_{1pb} \cdot i_{Fpb} + C_{0pb} \\ C_{3pc} \cdot i_{Fpc}^3 + C_{2pc} \cdot i_{Fpc}^2 + C_{1pc} \cdot i_{Fpc} + C_{0pc} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Por fim, substituindo a equação (4.22) em (4.21), chega-se a equação (4.23) que equaciona o sistema da Figura 4.7 durante o semiciclo positivo da tensão no ponto de falta de uma FAI.

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} v_{\rho_a}(t) \\ v_{\rho_b}(t) \\ v_{\rho_c}(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} D_F & 0 & 0 \\ 0 & D_F & 0 \\ 0 & 0 & D_F \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} R_{aa} & R_{ab} & R_{ac} \\ R_{ba} & R_{bb} & R_{bc} \\ R_{ca} & R_{cb} & R_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a'(t) \\ i_b'(t) \\ i_c'(t) \end{bmatrix} \right\} - \\
 &\frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} D_F^2 & 0 & 0 \\ 0 & D_F^2 & 0 \\ 0 & 0 & D_F^2 \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} R_{aa} & R_{ab} & R_{ac} \\ R_{ba} & R_{bb} & R_{bc} \\ R_{ca} & R_{cb} & R_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_{aa} & C_{ab} & C_{ac} \\ C_{ba} & C_{bb} & C_{bc} \\ C_{ca} & C_{cb} & C_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a'(t) \\ v_b'(t) \\ v_c'(t) \end{bmatrix} + \right. \\
 &\quad \left. \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_{aa} & C_{ab} & C_{ac} \\ C_{ba} & C_{bb} & C_{bc} \\ C_{ca} & C_{cb} & C_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a''(t) \\ v_b''(t) \\ v_c''(t) \end{bmatrix} \right\} + \\
 &\quad \left[ \begin{aligned} &C_{7\rho_a} \cdot i_{F\rho_a}(t)^7 + C_{6\rho_a} \cdot i_{F\rho_a}(t)^6 + C_{5\rho_a} \cdot i_{F\rho_a}(t)^5 + C_{4\rho_a} \cdot i_{F\rho_a}(t)^4 + \\ &C_{7\rho_b} \cdot i_{F\rho_b}(t)^7 + C_{6\rho_b} \cdot i_{F\rho_b}(t)^6 + C_{5\rho_b} \cdot i_{F\rho_b}(t)^5 + C_{4\rho_b} \cdot i_{F\rho_b}(t)^4 + \\ &C_{7\rho_c} \cdot i_{F\rho_c}(t)^7 + C_{6\rho_c} \cdot i_{F\rho_c}(t)^6 + C_{5\rho_c} \cdot i_{F\rho_c}(t)^5 + C_{4\rho_c} \cdot i_{F\rho_c}(t)^4 + \\ &C_{3\rho_a} \cdot i_{F\rho_a}(t)^3 + C_{2\rho_a} \cdot i_{F\rho_a}(t)^2 + C_{1\rho_a} \cdot i_{F\rho_a}(t) + C_{0\rho_a} \\ &C_{3\rho_b} \cdot i_{F\rho_b}(t)^3 + C_{2\rho_b} \cdot i_{F\rho_b}(t)^2 + C_{1\rho_b} \cdot i_{F\rho_b}(t) + C_{0\rho_b} \\ &C_{3\rho_c} \cdot i_{F\rho_c}(t)^3 + C_{2\rho_c} \cdot i_{F\rho_c}(t)^2 + C_{1\rho_c} \cdot i_{F\rho_c}(t) + C_{0\rho_c} \end{aligned} \right]
 \end{aligned} \tag{4.23}$$

A equação (4.23) está na forma completa do modelo que representa o comportamento do sistema durante uma FAI. Isso significa que essa equação pode ser utilizada para FAIs em qualquer uma das três fases do sistema bastando, apenas, selecionar os dados adequados da fase em falta. Sendo assim, considerando uma FAI na fase *a*, a equação (4.23) fica conforme (4.24).

$$\begin{aligned}
 v_{\rho_a}(t) &= H_{1\rho_a}(t) \cdot D_F + H_{2\rho_a}(t) \cdot D_F^2 + C_{7\rho_a} \cdot i_{F\rho_a}(t)^7 + C_{6\rho_a} \cdot i_{F\rho_a}(t)^6 + \\
 &C_{5\rho_a} \cdot i_{F\rho_a}(t)^5 + C_{4\rho_a} \cdot i_{F\rho_a}(t)^4 + C_{3\rho_a} \cdot i_{F\rho_a}(t)^3 + C_{2\rho_a} \cdot i_{F\rho_a}(t)^2 + \\
 &C_{1\rho_a} \cdot i_{F\rho_a}(t) + C_{0\rho_a}
 \end{aligned} \tag{4.24}$$

Onde:

$$\begin{bmatrix} H_{1\rho_a}(t) \\ H_{1\rho_b}(t) \\ H_{1\rho_c}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{aa} & R_{ab} & R_{ac} \\ R_{ba} & R_{bb} & R_{bc} \\ R_{ca} & R_{cb} & R_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a'(t) \\ i_b'(t) \\ i_c'(t) \end{bmatrix} \tag{4.25}$$

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} H_{2\rho_a}(t) \\ H_{2\rho_b}(t) \\ H_{2\rho_c}(t) \end{bmatrix} &= -\frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} R_{aa} & R_{ab} & R_{ac} \\ R_{ba} & R_{bb} & R_{bc} \\ R_{ca} & R_{cb} & R_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_{aa} & C_{ab} & C_{ac} \\ C_{ba} & C_{bb} & C_{bc} \\ C_{ca} & C_{cb} & C_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a'(t) \\ v_b'(t) \\ v_c'(t) \end{bmatrix} + \\
 &\quad \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_{aa} & C_{ab} & C_{ac} \\ C_{ba} & C_{bb} & C_{bc} \\ C_{ca} & C_{cb} & C_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a''(t) \\ v_b''(t) \\ v_c''(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.26)
 \end{aligned}$$

A equação (4.24) pode ser reescrita conforme (4.27).

$$\begin{aligned}
 v_{\rho_a}(t) &= \begin{bmatrix} H_{1\rho_a}(t) & H_{2\rho_a}(t) & i_{F\rho_a}(t)^7 & i_{F\rho_a}(t)^6 & i_{F\rho_a}(t)^5 & i_{F\rho_a}(t)^4 & i_{F\rho_a}(t)^3 & i_{F\rho_a}(t)^2 & i_{F\rho_a}(t) & 1 \end{bmatrix} \cdot \\
 &\quad \begin{bmatrix} D_F & D_F^2 & C_{7\rho_a} & C_{6\rho_a} & C_{5\rho_a} & C_{4\rho_a} & C_{3\rho_a} & C_{2\rho_a} & C_{1\rho_a} & C_{0\rho_a} \end{bmatrix}^T \end{aligned} \quad (4.27)
 \end{aligned}$$

A equação (4.27) possui dez constantes desconhecidas (distância de falta e constantes do polinômio de sétima ordem) e são escritas para um determinado instante de tempo. Para determinar os valores dessas dez constantes são necessárias, no mínimo, dez equações. Considerando que uma nova equação pode ser formada a cada novo instante de tempo  $t$ , então são necessárias dez leituras no relé da subestação. Sendo assim, considerando a utilização da equação (4.27) na forma digital e uma janela de dados com  $N$  amostras, a equação (4.28) pode ser escrita.

O algoritmo desenvolvido utiliza uma janela de dados adaptativa. O tamanho dessa janela de dados aumenta de forma progressiva a cada amostra de corrente e tensão disponível no relé. Este procedimento aumenta a velocidade do algoritmo, uma vez que não é necessária uma janela completa de um ciclo.

Os procedimentos detalhados até o momento foram referentes ao semiciclo positivo da tensão no ponto de falta, entretanto repetindo-se o raciocínio para o semiciclo negativo, pode-se escrever a equação (4.29).

$$\begin{aligned}
 \underbrace{\begin{bmatrix} v_{pa}(m) \\ v_{pa}(m+1) \\ \vdots \\ v_{pa}(N) \end{bmatrix}}_l &= \underbrace{\begin{bmatrix} H_{1pa}(m) & H_{2pa}(m) & i_{Fpa}(m)^7 & i_{Fpa}(m)^6 & i_{Fpa}(m)^5 \\ H_{1pa}(m+1) & H_{2pa}(m+1) & i_{Fpa}(m+1)^7 & i_{Fpa}(m+1)^6 & i_{Fpa}(m+1)^5 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ H_{1pa}(N) & H_{2pa}(N) & i_{Fpa}(N)^7 & i_{Fpa}(N)^6 & i_{Fpa}(N)^5 \end{bmatrix}}_M \\
 &\quad \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} i_{Fpa}(m)^4 & i_{Fpa}(m)^3 & i_{Fpa}(m)^2 & i_{Fpa}(m) & 1 \\ i_{Fpa}(m+1)^4 & i_{Fpa}(m+1)^3 & i_{Fpa}(m+1)^2 & i_{Fpa}(m+1) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ i_{Fpa}(N)^4 & i_{Fpa}(N)^3 & i_{Fpa}(N)^2 & i_{Fpa}(N) & 1 \end{bmatrix}}_M \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} D_F \\ D_F^2 \\ C_{7pa} \\ C_{6pa} \\ C_{5pa} \\ C_{4pa} \\ C_{3pa} \\ C_{2pa} \\ C_{1pa} \\ C_{0pa} \end{bmatrix}}_P \\
 & \hspace{15em} (4.28)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \underbrace{\begin{bmatrix} v_{na}(m) \\ v_{na}(m+1) \\ \vdots \\ v_{na}(N) \end{bmatrix}}_l &= \underbrace{\begin{bmatrix} H_{1na}(m) & H_{2na}(m) & i_{Fna}(m)^7 & i_{Fna}(m)^6 & i_{Fna}(m)^5 \\ H_{1na}(m+1) & H_{2na}(m+1) & i_{Fna}(m+1)^7 & i_{Fna}(m+1)^6 & i_{Fna}(m+1)^5 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ H_{1na}(N) & H_{2na}(N) & i_{Fna}(N)^7 & i_{Fna}(N)^6 & i_{Fna}(N)^5 \end{bmatrix}}_M \\
 &\quad \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} i_{Fna}(m)^4 & i_{Fna}(m)^3 & i_{Fna}(m)^2 & i_{Fna}(m) & 1 \\ i_{Fna}(m+1)^4 & i_{Fna}(m+1)^3 & i_{Fna}(m+1)^2 & i_{Fna}(m+1) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ i_{Fna}(N)^4 & i_{Fna}(N)^3 & i_{Fna}(N)^2 & i_{Fna}(N) & 1 \end{bmatrix}}_M \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} D_F \\ D_F^2 \\ C_{7na} \\ C_{6na} \\ C_{5na} \\ C_{4na} \\ C_{3na} \\ C_{2na} \\ C_{1na} \\ C_{0na} \end{bmatrix}}_P \\
 & \hspace{15em} (4.29)
 \end{aligned}$$

As equações (4.28) e (4.29) são válidas para o circuito da Figura 4.7, o qual modela uma seção, entre a subestação e o ponto de falta, para uma determinada configuração de condutores ( $R_{abc}$ ,  $L_{abc}$ ,  $C_{abc}$ ). No caso de sistemas com mais de uma configuração de condutores, a metodologia proposta também pode ser utilizada. Para isso, cada configuração de condutor irá ser modelada conforme a Figura 4.7 e serão conectadas em cascata. Uma determinada seção será analisada caso a distância estimada para a falta seja maior que o comprimento total da seção anterior. Sendo assim, para aplicar a metodologia proposta na próxima seção, as tensões e correntes no nó inicial são necessárias. Os sinais de tensão e corrente podem ser propagados para o próximo nó utilizando a equação (4.14).

Cabe ressaltar, que a consideração da capacitância no equacionamento utilizado para modelar o alimentador durante as FAIs, torna o método proposto mais preciso, pois essa variável pode gerar erros significativos em alimentadores de grande porte e com configuração de condutores não transposta. Além disso, a utilização de componentes de fase torna o equacionamento adequado para alimentadores desequilibrados.

As equações (4.28) e (4.29) possuem constantes desconhecidas que precisam ser determinadas para que o local de incidência da falta seja definido. Sendo assim, a seguir será apresentado o método utilizado para estimação dos parâmetros desconhecidos, presente nas equações que modelam o comportamento do alimentador durante FAIs.

#### 4.3.4 Bloco 4: Estimação dos parâmetros desconhecidos através de uma RNA

A consideração da capacitância do alimentador no modelo de linha utilizado (Figura 4.7) faz com que o parâmetro referente a distância da falta ( $D_F$ ) apareça elevado ao quadrado nas equações que modelam o comportamento do alimentador durante a FAI. Devido a isso, a utilização de técnicas lineares não é adequada para estimação dos parâmetros desconhecidos dessas equações.

Em Iurinic, Orozco e Bretas (2015) é proposta a utilização do Método de Newton para solução dessas equações não lineares. Entretanto, os resultados obtidos nesse trabalho geraram erros superiores a 10% em alguns casos, mesmo em um sistema teste de 1,5 km. Outros trabalhos, como o proposto por Bretas et al. (2006),

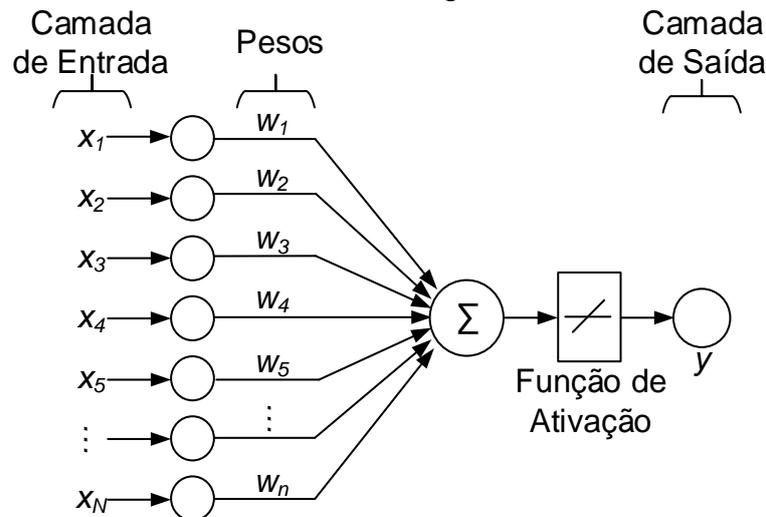
desconsideram a componente capacitiva da linha afim de simplificar o modelo do sistema para equações lineares. Essa consideração não é a mais adequada, pois essa componente pode ter uma influência significativa em alimentadores longos e assim aumentar os erros na estimação da distância da falta.

Dessa maneira, devido a importância da consideração da capacitância e consequente necessidade de mapeamentos não lineares, nesse trabalho foi utilizado uma RNA para estimar os parâmetros desconhecidos das equações (4.28) e (4.29). Entretanto, ao contrário dos métodos tradicionais, a RNA proposta nesse trabalho não necessita de treinamento prévio, pois ela é continuamente treinada somente a partir do início da FAI.

As RNAs são sistemas de computação adaptativos inspirados nas características de processamento de informação encontradas nos neurônios reais e nas características de suas interconexões (HAYKIN, 1999). As RNAs são formadas por um conjunto de neurônios artificiais que interagem entre si, semelhante ao funcionamento dos neurônios biológicos.

A Figura 4.8 apresenta a estrutura básica de um neurônio artificial. Nessa estrutura os pesos  $w$  amplificam cada um dos sinais de entrada  $x$ . A função de ativação determina a forma como o neurônio responde ao nível de excitação, limitando e definindo a saída da RNA. Nos métodos tradicionais que utilizam RNAs, o treinamento é realizado previamente (*offline*) através de pares de entradas e saídas contidos em um banco de dados. A partir desses pares, o algoritmo de treinamento da RNA ajusta iterativamente seus pesos  $w$  de modo a obter a menor diferença entre a saída obtida na RNA e aquela contida nos pares. O aprendizado ocorre quando o algoritmo de treinamento da RNA atinge uma solução generalizada para o grupo de pares de entradas e saídas.

Figura 4.8 - Modelo artificial de um neurônio biológico



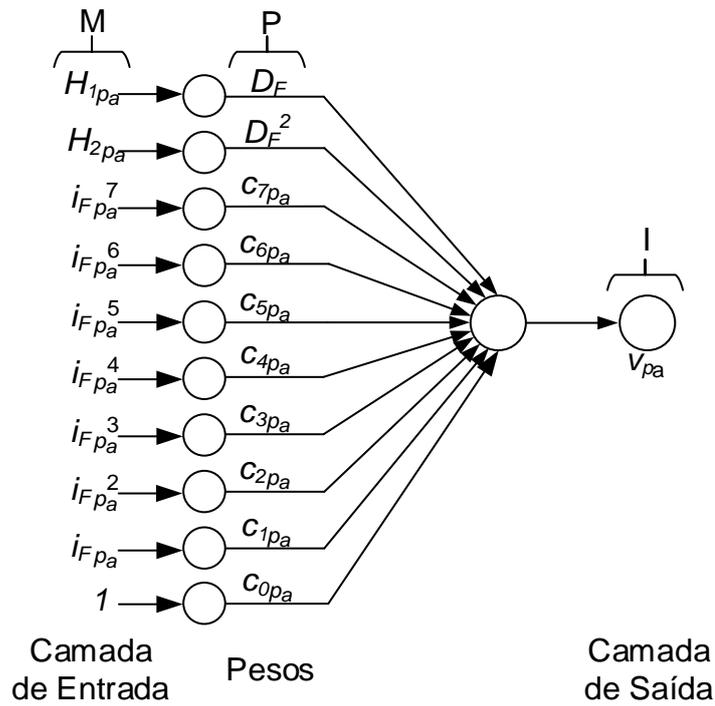
Fonte: O autor

Uma das principais características das RNAs é a sua capacidade de alcançar uma solução generalizada mesmo em pares de entrada e saída com relações não lineares. Sendo assim, devido a essas características, as RNAs também podem ser utilizadas para estimação de parâmetros desconhecidos de equações não lineares, desde que a RNA seja estruturada de forma adequada. Além disso, nessa função, a RNA não precisa ser treinada previamente, pois o ajuste dos pesos é realizado de forma contínua durante a execução do algoritmo.

Dessa maneira, como o objetivo da RNA é estimar os parâmetros desconhecidos das equações (4.28) e (4.29), essas equações foram utilizadas para estruturar duas RNAs, uma para estimar os parâmetros da equação (4.28) e outra para a (4.29). As duas RNAs possuem a mesma arquitetura, entretanto irão ajustar seus pesos de forma independente, pois possuem diferentes pares de entrada e saída.

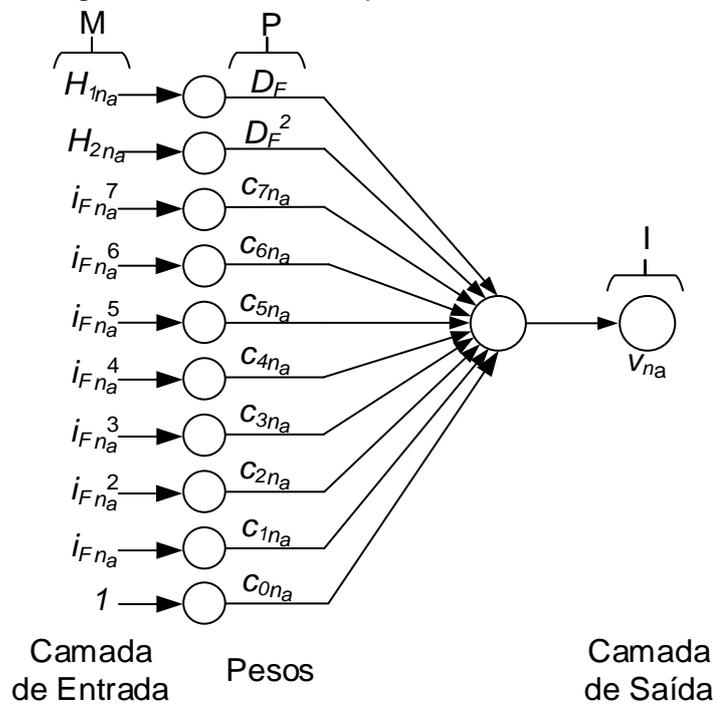
As arquiteturas dessas duas RNAs são apresentadas nas Figura 4.9 e Figura 4.10, respectivamente. Cada RNA possui um neurônio com dez entradas e uma saída. Os dados de entrada de cada RNA serão os parâmetros da matriz  $M$  das equações (4.28) e (4.29). Os pesos serão os parâmetros que se deseja estimar, ou seja, matriz  $P$ . Enquanto as saídas serão os dados da matriz  $I$ .

Figura 4.9 - Estrutura da RNA utilizada para estimar as constantes desconhecidas durante o semiciclo positivo da tensão no ponto de falta



Fonte: O autor

Figura 4.10 - Estrutura da RNA utilizada para estimar as constantes desconhecidas durante o semiciclo negativo da tensão no ponto de falta



Fonte: O autor

O ajuste dos pesos (treinamento) de cada RNA é realizado de forma contínua, após o início da FAI, através do algoritmo de treinamento de Levenberg-Marquardt (MARQUARDT, 1963). Assim, sempre que uma nova amostra de tensão e corrente é adquirida na subestação, uma nova equação é acrescentada nas matrizes das equações (4.28) ou (4.29), dependendo do semiciclo que a tensão no ponto de falta está (positivo ou negativo). Após isso, o algoritmo de treinamento recalcula os seus pesos de forma a obter uma solução generalizada para a equação (4.28) e outra para a equação (4.29).

Dessa forma, o algoritmo de treinamento utilizado possui a função de solucionar as equações não lineares, estimando seus parâmetros desconhecidos através do ajuste de seus pesos.

#### 4.3.5 Bloco 5: Critério de convergência

O valor final apresentado pelo algoritmo como distância para o local de incidência da FAI será aquele que ocorrer no instante que o valor estimado esteja convergindo para um certo valor. Para identificar esse instante, as equações (4.30) e (4.31) são utilizadas. Se ambas as equações forem verdadeiras, a última distância estimada para a FAI será considerada como estimativa final.

Devido ao fato de existirem duas estimativas possíveis para distância de incidência da FAI, uma para o neurônio da Figura 4.9 e outra para o neurônio da Figura 4.10, o valor final apresentado como estimativa para distância da FAI será aquele estimado pelo neurônio que primeiro atender os critérios de convergências das equações (4.30) e (4.31).

Apesar de cada um dos neurônios estimar um valor para distancia da falta, as duas distancias estimadas convergem para valores próximos. Isso será apresentado no Capítulo 5, onde um caso de FAI será utilizado para detalhar todas etapas do método proposto.

$$|D_F(m) - D_F(m-1)| < \varepsilon \quad (4.30)$$

$$|D_F(m) - D_F(m-2)| < \varepsilon \quad (4.31)$$

Onde:

$D_F$  é a distância estimada para a falta em metros;

$\varepsilon$  é a diferença entre duas distancias estimadas para FAI ( $\varepsilon=10$ );

$m$  é o índice referente a posição da amostra.

#### 4.4 CÁLCULO DAS DERIVADAS

As equações (4.28) e (4.29), utilizadas para realizar a estimativa da distância de falta, possuem derivadas temporais de alguns sinais, por isso é necessário algum método para sua estimação. Foram estudados diversos métodos de estimação dessas derivadas, sendo selecionado aquele que apresentou os melhores resultados.

A técnica utilizada consiste na aproximação dos sinais por um polinômio de ordem  $k$ , dentro de uma janela móvel, conforme a equação (4.32). Nessa equação,  $t_0$  e  $t_f$  são os instantes iniciais e finais da janela móvel. Após essa aproximação, aplica-se a derivada analítica nos polinômios.

$$y(t) = p_1.t^k + p_2.t^{k-1} + \dots + p_{n-1}.t^2 + p_n.t + p_0, t_0 \leq t \leq t_f \quad (4.32)$$

A aproximação dos sinais por polinômios foi realizada através da função *polyfit* do software MatLab®. Para isso, a função *polyfit* estrutura as amostras da janela de dados conforme a equação (4.5). Por fim, os coeficientes  $p$  são obtidos através do uso de uma matriz pseudo inversa conforme a equação (4.6).

Após estimado os coeficientes  $p$ , a primeira e segundo derivadas do sinal podem ser escritas para o instante  $t$  conforme as equações (4.33) e (4.34), respectivamente.

$$y(t)' = k.p_1.t^{k-1} + (k-1).p_2.t^{k-2} + \dots + 2.p_{n-1}.t + p_n \quad (4.33)$$

$$y(t)'' = k.(k-1).p_1.t^{k-2} + (k-1).(k-2).p_2.t^{k-3} + \dots + 2.p_{n-1} \quad (4.34)$$

O procedimento de estimação dos coeficientes e cálculo da derivadas é repetido para todas as amostras do sinal, mantendo-se constante o tamanho das

janelas e a ordem polinomial utilizada na aproximação. Foram testados diversas ordens de polinômio e tamanhos da janela móvel afim de obter o menor erro na estimativa da distância de falta. Assim, foram selecionados o polinômio de quarta ordem e uma janela móvel de dezesseis amostras.

#### 4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo apresentou a metodologia proposta nesse trabalho para estimação da distância de incidência de FAIs em sistemas de distribuição. O principal aspecto inovador da proposta está no uso de um polinômio de sétima ordem para modelar a curva  $V \times I$  de diferentes tipos de solos durante uma FAI.

Outro aspecto inovador da proposta está no método de solução das equações não lineares que modelam o comportamento do alimentador durante uma FAI. Esse método consiste no uso de uma RNA, cujo treinamento é realizado de modo contínuo e somente após o início da FAI. Sendo assim, o método proposto não necessita de ajustes prévios, pois todos dados necessários são obtidos dos relés ou do banco de dados da concessionária. Essa característica, torna a metodologia proposta mais robusta e simples de ser implementada.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Nesse capítulo são apresentados os resultados obtidos nas simulações realizadas para o processo de validação do método proposto. No primeiro momento, um caso de FAI é utilizado para exemplificar passo-a-passo a metodologia de estimação da distância da falta.

No segundo momento, o desempenho do algoritmo é avaliado diante da incidência de FAIs em diferentes tipos de solos, ângulos de incidência de falta e nível de carregamento do alimentador. Também foi avaliada a eficácia da metodologia de estimação da corrente no ponto de falta. Por fim, é apresentada uma análise comparativa entre o método proposto nesse trabalho e o apresentado em Iurinic, Orozco e Bretas (2015).

### 5.2 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS UTILIZADAS

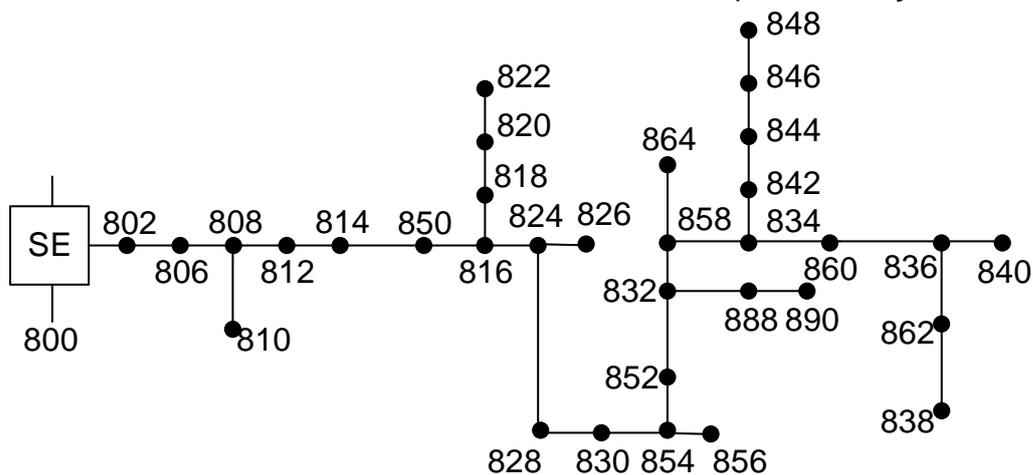
As simulações de FAIs foram realizadas no software ATPDraw. O ATPDraw é a versão gráfica do software ATP (*Alternative Transients Program*) que teve sua primeira versão no início de 1984 e seus desenvolvedores foram os Drs. W. Scott Meyer e Tsuhuei Liu. Esse software é um conjunto completo de ferramentas para simulação e análise de transitórios eletromagnéticos. Foi inicialmente desenvolvida para analisar sistemas elétricos de potência. É também capaz de simular sinais de controle, aplicações de eletrônica de potência e demais situações híbridas envolvendo as áreas comentadas anteriormente.

Em virtude do alto desempenho voltado ao cálculo numérico e a facilidade de programação, muitos usuários utilizam o programa MATLAB® como primeira ferramenta para elaboração e testes de algoritmos. Depois de elaborado e validado, o algoritmo pode ser convertido para qualquer linguagem de programação a fim de implementá-lo em equipamentos reais. Sendo assim, nesse trabalho, todos os algoritmos analisados foram desenvolvidos no programa MATLAB®.

### 5.3 SISTEMA TESTE

A fim de validar o algoritmo proposto, foi modelado no software ATPDraw o sistema teste IEEE 34 barras, cujo diagrama unifilar é apresentado na Figura 5.1. Esse é um sistema real que está localizado no estado norte americano do Arizona e incorpora todas as possíveis configurações práticas e características de carga de um sistema real de distribuição. De modo a simplificar a implementação do método, foram retirados do sistema teste os reguladores de tensão e o transformador presente entre os nós 832 e 888. A tensão de linha do alimentador foi alterada para 13,8 kV e as cargas modeladas como impedância constante. Os parâmetros utilizados no sistema teste são detalhados no Apêndice A.

Figura 5.1 - Sistema IEEE 34 barras modificado utilizado para validação



Fonte: Adaptado de *Distribution System Analysis Subcommittee. IEEE 34 Node Test Feeder*

No primeiro momento, um caso de curto-circuito será utilizado para detalhar todas as etapas do método proposto. No segundo momento, a performance do algoritmo será analisada diante das quatro situações abaixo. Por fim, o desempenho do método proposto nesse trabalho é comparado ao obtido por Iurinic, Orozco e Bretas (2015). Em todos os casos, as FAIs foram simuladas através da interrupção de uma das fases e consequente contato com as diferentes superfícies da Figura 2.7. Os nós utilizados nas simulações são os apresentados na Tabela 5.1.

- Influência do tipo de solo;
- Influência da estimativa da corrente de falta;
- Influência do ângulo de incidência da falta;

- Influência do carregamento do alimentador.

O desempenho foi avaliado através do erro percentual na estimação da distância da falta. Para isso, a equação (5.1) foi utilizada.

$$erro_{DF}(\%) = \frac{|D_{Fr} - D_F|}{L_T} \cdot 100 \quad (5.1)$$

Onde:

$D_F$  é a distância estimada para a ocorrência da falta;

$D_{Fr}$  é a distância real de ocorrência da falta;

$L_T$  é a soma de todos os trechos do alimentador (91,29 km).

Tabela 5.1 - Nós utilizados para simulações de FAIs

Nó	Distância (m)	Nó	Distância (m)	Nó	Distância (m)
808	11137	818	32251	860	56602
812	22567	852	52713	846	57593
814	31628	858	54209	840	57681
828	35098	864	54703	848	57754
830	41328	834	55986	838	58485

#### 5.4 CASO DETALHADO

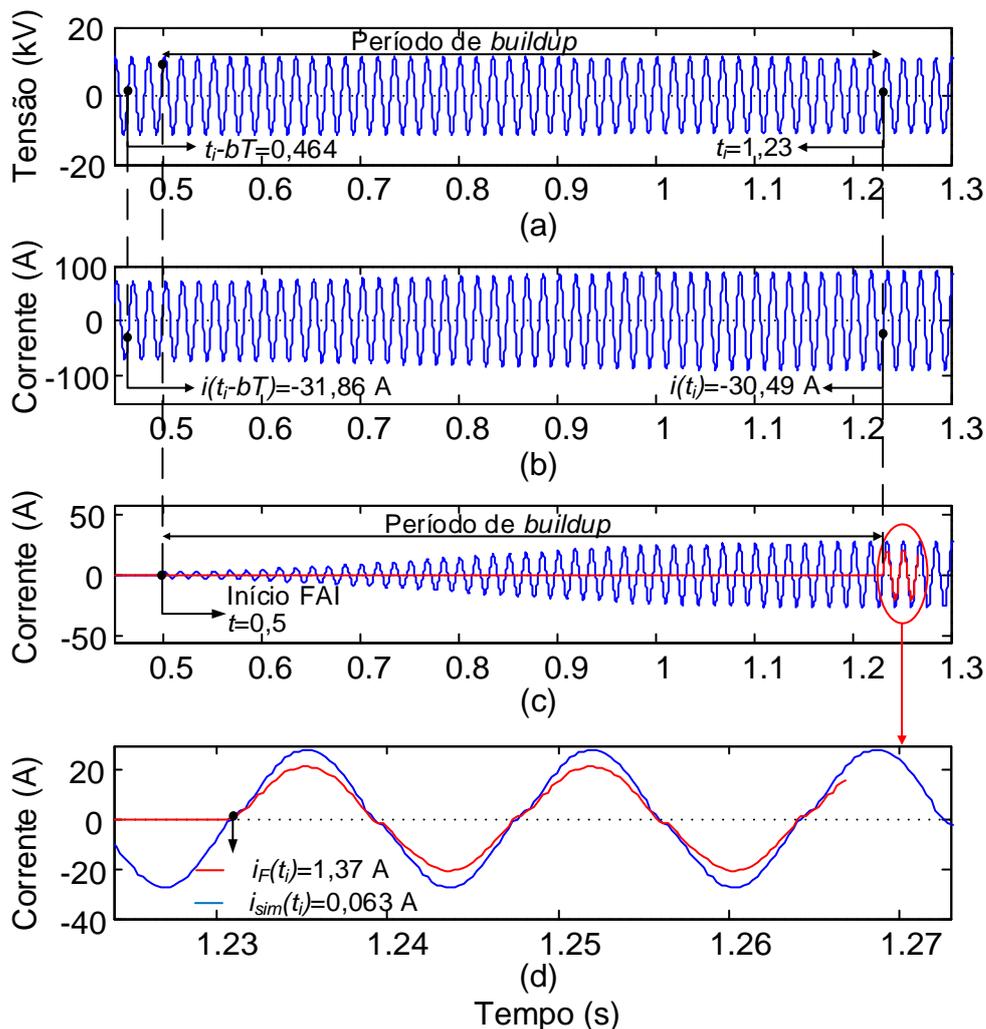
Para validar a metodologia proposta e apresentar os resultados de forma detalhada, foi simulada uma FAI em uma superfície de paralelepípedo, no nó 860 do sistema teste da Figura 5.1. Esse nó está distante 56,6 km da subestação. A FAI ocorreu no instante 0,5s.

A primeira etapa executada pelo algoritmo, após o início da FAI, é a estimação da corrente no ponto de falta. Para isso, o algoritmo aguarda o fim da etapa de *buildup* e realiza o sincronismo entre as amostras pré-falta e de falta. Esse sincronismo é realizado através de um detector de passagem por zero aplicado ao sinal de tensão da fase em falta medido na subestação. Esse detector identifica quando o valor instantâneo da tensão da fase em falta muda de negativo para positivo. Apesar de

existirem outras técnicas mais robustas para detecção da passagem por zero, a metodologia utilizada possui um baixo custo computacional e obtém resultados satisfatórios quando não são identificados componentes harmônicos ou níveis de ruídos que gerem múltiplas passagens por zero. Entretanto, para aplicações em que existam altos níveis de ruídos, outras metodologias mais robustas podem ser utilizadas sem afetar o desempenho do método proposto.

A etapa de sincronismo entre as amostras pré-falta e de falta pode ser observada na Figura 5.2a. Nesse exemplo, o sincronismo ocorre nos instantes 0,464s e 1,23 s. A partir desses instantes, é realizada a diferença entre as amostras da corrente pré-falta e de falta conforme a equação (4.12). Essa etapa pode ser observada na Figura 5.2b.

Figura 5.2 - Estimação da corrente no ponto de falta. (a) Tensão na fase em falta (b) Corrente na fase em falta; (c) Corrente no ponto de falta simulada (azul) e estimada (vermelho); (d) corrente no ponto de falta simulada (azul) e estimada (vermelho).



Fonte: O autor

Na figura 5.2c e, de forma mais clara na Figura 5.2d, pode ser observado a diferença entre a corrente no ponto de falta obtida através de simulação no software ATPDraw ( $i_{sim}$ ) e aquela estimada através da metodologia proposta nesse trabalho ( $i_{est}$ ). A diferença de amplitude, entre as correntes simuladas e estimadas, deve-se a diferença entre a corrente de carga durante a falta e a pré-falta. Essa variação na corrente de carga se deve ao aumento da queda de tensão no alimentador durante a falta e também devido a parcela da carga que deixa de ser atendida devido ao rompimento do condutor.

Após estimada as primeiras amostras da corrente de falta, o algoritmo estrutura as matrizes conforme as equações apresentadas em (4.28) e (4.29), dependendo do semiciclo que a tensão no ponto de falta está, positivo ou negativo, respectivamente. Para verificar em qual semiciclo a tensão no ponto de falta está, o algoritmo analisa em qual semiciclo está a corrente estimada no ponto de falta. Essa análise pode ser realizada, pois conforme Jeering (1989) e Emanuel et al. (1990), as FAIs possuem um comportamento resistivo no sentido em que a corrente é zero quando a tensão passa por zero.

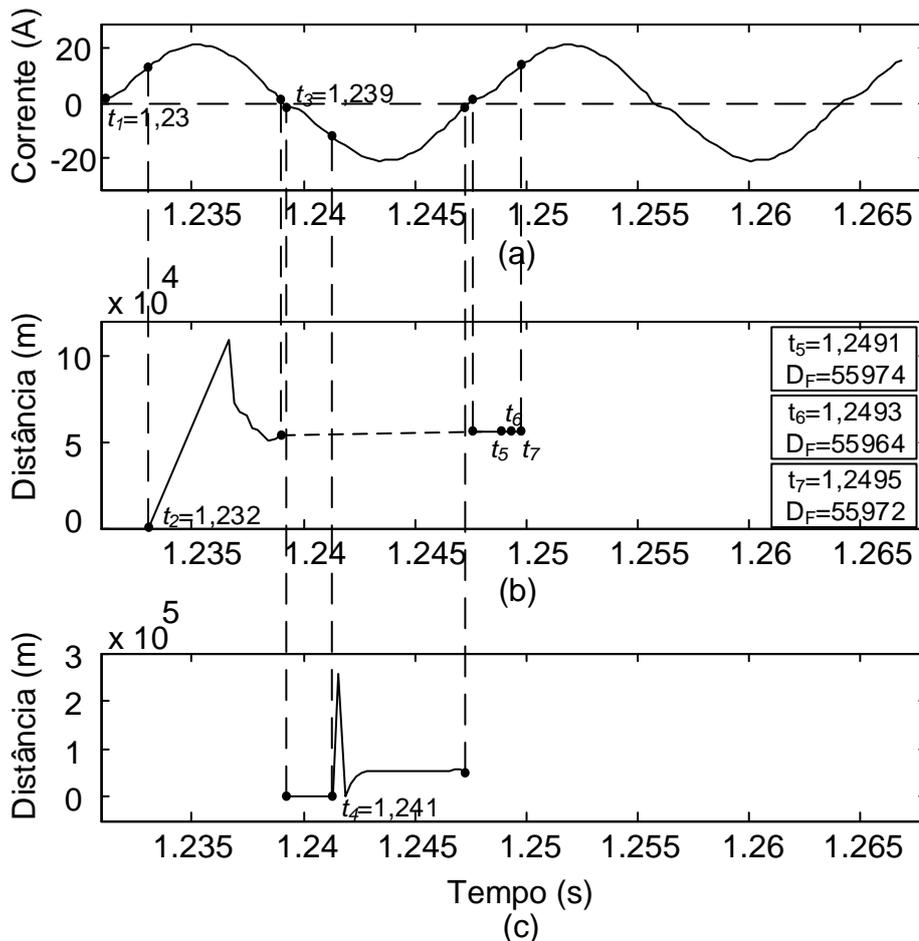
A partir do instante que qualquer uma das matrizes das equações (4.28) ou (4.29) possuírem um número de linhas igual ou maior a dez, os dados dessas matrizes são utilizados como entradas e saídas nas RNAs conforme as Figuras 4.9 e 4.10. Os parâmetros desconhecidos das equações (4.28) e (4.29) serão estimados através do ajuste dos pesos de cada RNA.

Para cada nova amostra adquirida de tensão e corrente, uma nova amostra da corrente de falta é estimada e, conseqüentemente, uma nova linha é acrescentada nas equações (4.28) ou (4.29), dependendo do semiciclo da tensão no ponto de falta. Após isso, o algoritmo de treinamento da RNA, referente a equação em que foi acrescentada a nova linha, recalcula os seus pesos de forma a obter uma solução generalizada para essa equação.

Sendo assim, a Figura 5.3 apresenta o resultado obtido na estimação da distância da falta ( $D_F$ ) pelas RNAs referentes ao semiciclo positivo (Figura 5.3b) e semiciclo negativo da tensão no ponto de falta (Figura 5.3c). Como pode ser observado nessas duas figuras,  $D_F$  só passou a ser estimado após dez amostras de  $i_F$  terem sido estimadas, ou seja, diferença entre  $t_1$  e  $t_2$  para o semiciclo positivo e diferença entre  $t_3$  e  $t_4$  para o semiciclo negativo. Esse número de amostras é

necessário devido ao número de parâmetros desconhecidos das equações (4.28) e (4.29).

Figura 5.3 - Critério de convergência. (a) Corrente estimada no ponto de falta; (b)  $D_F$  estimada durante semiciclo positivo da tensão no ponto de falta; (c)  $D_F$  estimada durante semiciclo negativo da tensão no ponto de falta.



Fonte: O autor

Os critérios de convergência das equações (4.30) e (4.31) foram primeiramente atendidos no instante  $t_7$  durante o semiciclo positivo da tensão no ponto de falta. Isso pode ser observado na Figura 5.3b e nas equações (5.2) e (5.3). Também pode ser observado na Figura 5.3b, que foram necessárias, aproximadamente, quarenta amostras do relé (1/2 do primeiro ciclo positivo + 1/8 do segundo ciclo positivo) para o algoritmo convergir. Isso quer dizer que foram necessárias quarenta linhas na matriz da equação (4.28) para que o algoritmo de treinamento conseguisse ajustar os pesos da RNA referente a essa equação de modo a obter uma solução generalizada.

$$|55972 - 55964| < 10 \quad (5.2)$$

$$|55972 - 55974| < 10 \quad (5.3)$$

O tempo total para o algoritmo apresentar uma estimativa da distância da FAI, ou seja, a diferença entre o instante que o algoritmo convergiu (1,2495 s) e o instante de início da FAI (0,5s), é 0,7495s. A maior parte desse tempo se deve ao fato de que, na metodologia proposta, é necessário aguardar o fim do período de *buildup* para que a amplitude da corrente de falta deixe de crescer e assim a RNA possa ser utilizada.

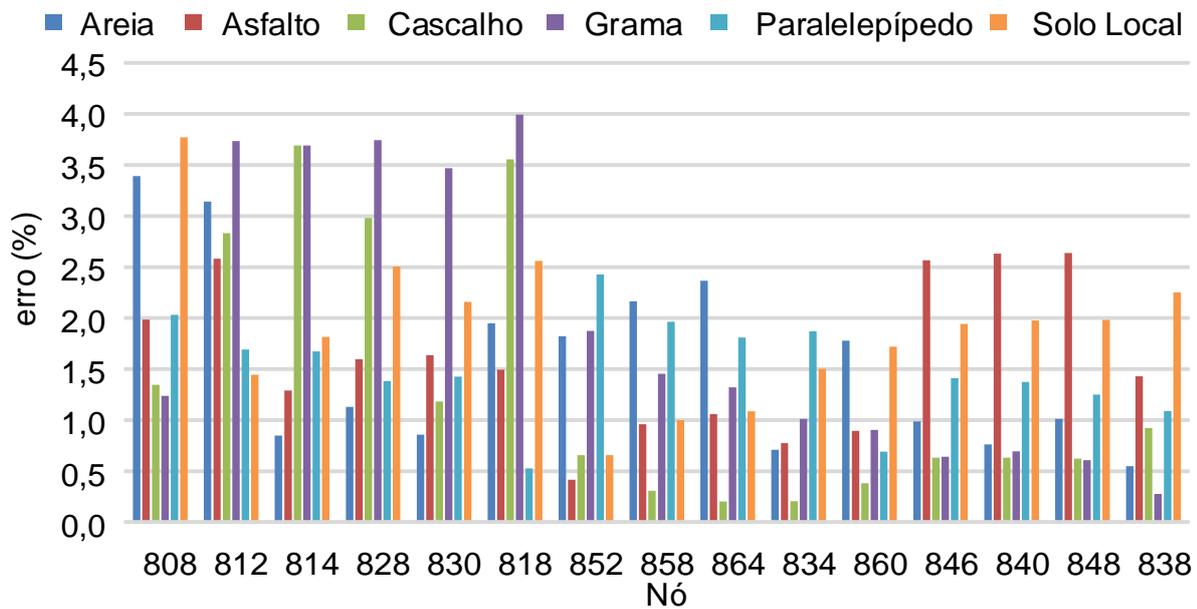
Considerando a equação (5.1), o erro obtido na estimação da distância da falta foi de 0,7%, ou seja, 630 m. Esse erro é satisfatório, quando comparado a outros métodos de localização de FAIs propostos na literatura como: Moreto (2005): 1,5%, Bretas et al. (2006): 5%, Fanucchi (2014): 10,02%, Iurinic, Orozco e Bretas (2015): 17%.

## 5.5 INFLUÊNCIA DO TIPO DE SOLO

Um dos principais diferenciais do método proposto nesse trabalho é a sua capacidade de localizar FAIs independentemente do tipo de solo que essa incidir. Essa característica se deve ao modelo polinomial de sétima ordem utilizado para equacionar as diferentes curvas  $V \times I$  possíveis de ocorrer durante uma FAI. Sendo assim, afim de avaliar o desempenho do método para os diferentes tipos de solos, foram simuladas FAIs nos quinze nós da Tabela 5.1, utilizando os seis tipos de solos abordados na Figura 2.7. Além disso, o ângulo de incidência da tensão no ponto de falta foi de 90°. A Figura 5.4 apresenta o erro percentual obtido na estimação da distância de cada uma dessas FAIs.

De modo geral, os erros na estimação da distância da FAI oscilaram entre 0,2% e 4%, sendo que em 90% dos casos testados o erro foi inferior a 3%. Esse erro é considerado satisfatório quando comparado a outros métodos propostos na literatura, principalmente quando se analisa que o método proposto foi avaliado para FAIs em seis tipos de solos, ao contrário de outros trabalhos propostos na literatura que validam seus métodos para apenas um tipo de solo.

Figura 5.4 - Análise da influência do tipo de solo



Fonte: O autor

Sendo assim, considerando os erros obtidos e a capacidade de localizar FAIs em diferentes tipos de solos, pode-se considerar que o equacionamento proposto nesse trabalho é capaz de modelar de forma satisfatória o comportamento do alimentador durante FAIs envolvendo diferentes tipos de solos.

## 5.6 INFLUÊNCIA DA ESTIMAÇÃO DA CORRENTE NO PONTO DE FALTA ( $i_F$ )

Uma das vantagens do método proposto nesse trabalho é não necessitar da instalação de equipamentos adicionais de medição no decorrer do alimentador, pois todas as informações necessárias para os cálculos são adquiridas através da tensão e corrente, já medidas na subestação, e dos parâmetros da rede. Uma dessas informações é a corrente no ponto de falta ( $i_F$ ) que é estimada através do processo descrito na seção 4.3.2.

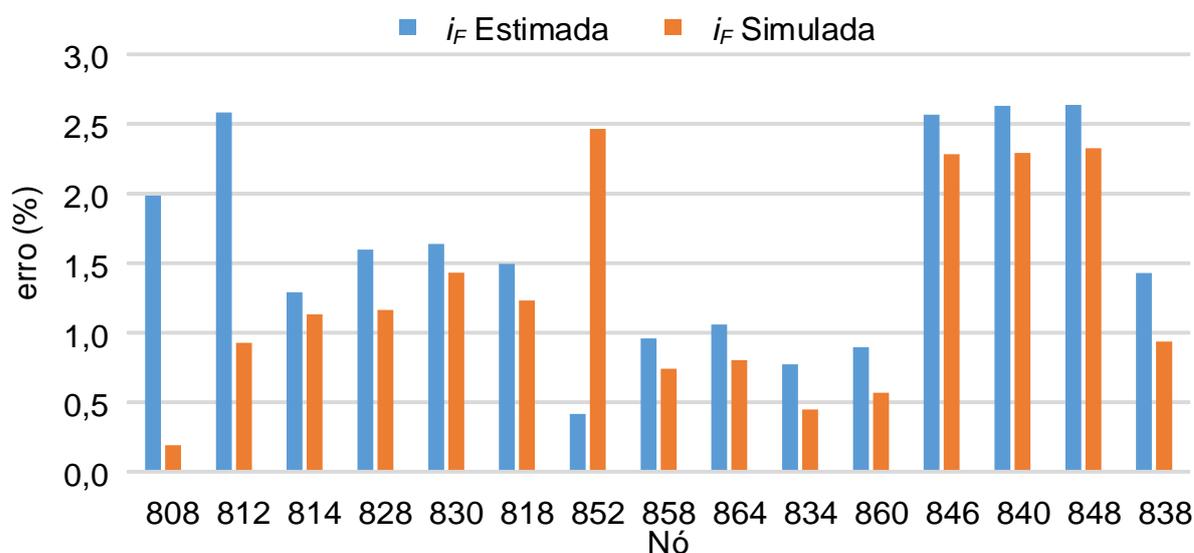
A estimação correta desse parâmetro é de grande importância, pois esse será utilizado diretamente na determinação do local de incidência da FAI. Além disso,  $i_F$  é elevada até a sétima potência no cálculo dos coeficientes dos polinômios que modelam a tensão no ponto de falta durante uma FAI. Devido a isso, um erro elevado

na estimação dessa variável irá ocasionar um erro ainda maior na determinação da distância da falta.

Sendo assim, afim de avaliar a metodologia proposta para estimação de  $i_F$  e seu impacto na determinação da distância da FAI, o algoritmo de localização foi executado utilizando a corrente estimada conforme a seção 4.3.2 e também a obtida através de simulação no software ATPDraw. As FAIs foram simuladas no solo tipo asfalto, com ângulo de incidência de  $90^\circ$  e nos quinze nós apresentados na Tabela 5.1. O solo tipo asfalto foi selecionado para essa análise, pois, conforme a Figura 2.7, é o que apresenta a maior assimetria na corrente de falta. Dessa maneira, espera-se que FAIs envolvendo esse tipo de superfície apresente as maiores dificuldades para a estimação de  $i_F$ .

O desempenho do método proposto, para as duas variações de  $i_F$ , pode ser visualizado na Figura 5.5.

Figura 5.5 - Análise da influência da estimação da corrente no ponto de falta



Fonte: O autor

Como pode ser observado na Figura 5.5, de modo geral, os erros na estimação da distância da FAI foram menores quando a corrente simulada no software ATPDraw foi utilizada. Nesse caso, o erro máximo foi de, aproximadamente, 2,5% para uma FAI no nó 852 a 52713 m da subestação. Esses baixos erros demonstram que o modelo proposto nesse trabalho, através das equações (4.28) e (4.29), é adequado

para representar o comportamento de um alimentador durante a ocorrência de uma FAI.

Quando a corrente de falta estimada foi utilizada nos cálculos, os erros na estimação da distância da FAI aumentaram. Isso pode ser explicado pelo erro na estimativa de  $i_F$  devido a variação da corrente de carga durante a falta. Essa variação faz com que, normalmente,  $i_F$  seja estimada com amplitude inferior ao valor verdadeiro. Essa característica foi apresentada na Figura 5.2d.

Além disso, o erro gerado pela estimativa da  $i_F$  justifica o fato pelo qual no nó 852 o algoritmo obteve melhor resultado quando foi utilizada  $i_F$  estimada. Nesse caso, o erro gerado pela estimativa de  $i_F$  ocasionou uma subestimativa na distância da FAI, o que, coincidentemente, tornou-a mais próxima da distância real.

Apesar do aumento do erro quando utilizada a  $i_F$  estimada, esses permaneceram abaixo de 2,6% em todos casos testados. Sendo assim, devido a esses reduzidos erros, a simplicidade do método e o seu baixo custo financeiro e computacional, pode-se considerar a metodologia de estimação da corrente no ponto de falta adequada para utilização na estimação da distância da FAI.

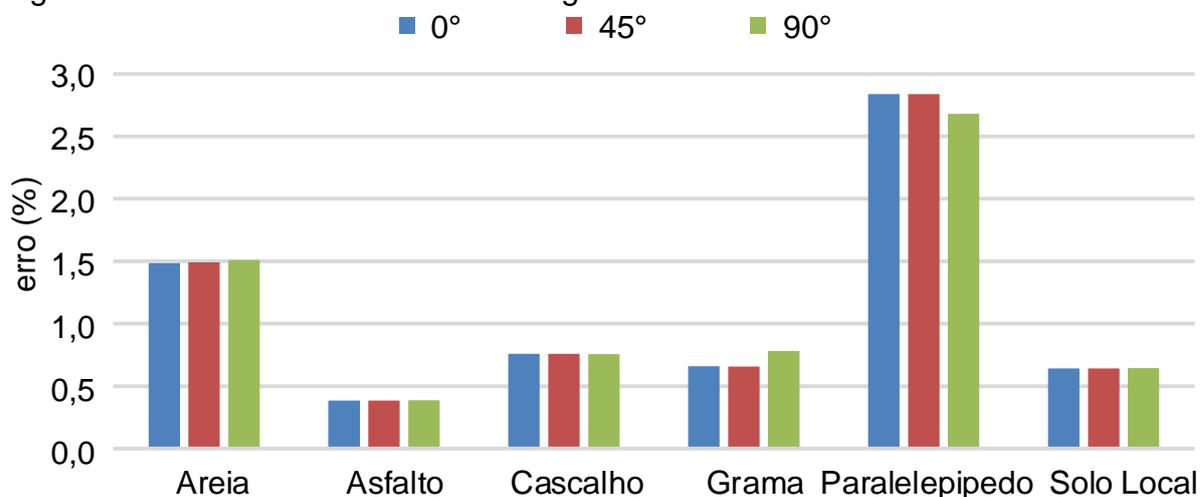
## 5.7 INFLUÊNCIA DO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA DE FALTA

A análise do desempenho do método proposto diante de diferentes ângulos de incidência de falta é de grande importância, pois a amplitude da tensão no ponto e no instante da falta, influência diretamente na magnitude da corrente de curto-circuito. Sendo assim, foram simuladas FAIs com os diferentes tipos de solos no nó 852 do sistema teste da Figura 5.1. Além disso, o ângulo da tensão no ponto de falta foi variado entre 0°, 45° e 90°.

A Figura 5.6 apresenta o erro obtido, nos diferentes tipos de solos, para os três ângulos testados. Através dessa figura, pode-se perceber que não houve variação considerável no erro de estimação quando o ângulo de incidência foi alterado. Essa característica se deve ao fato de a distância da falta começar a ser estimada sempre a partir do instante que a tensão da fase em falta passa por zero. Dessa maneira, independentemente do ângulo de incidência do defeito, a distância será estimada sempre a partir do início do semiciclo positivo. Esse procedimento foi descrito na seção 4.3.2 quando as etapas de estimação da corrente no ponto de falta foram detalhadas.

Sendo assim, pode-se considerar que o método proposto nesse trabalho independe do instante que o defeito ocorreu.

Figura 5.6 - Análise da influência do ângulo incidência da FAI



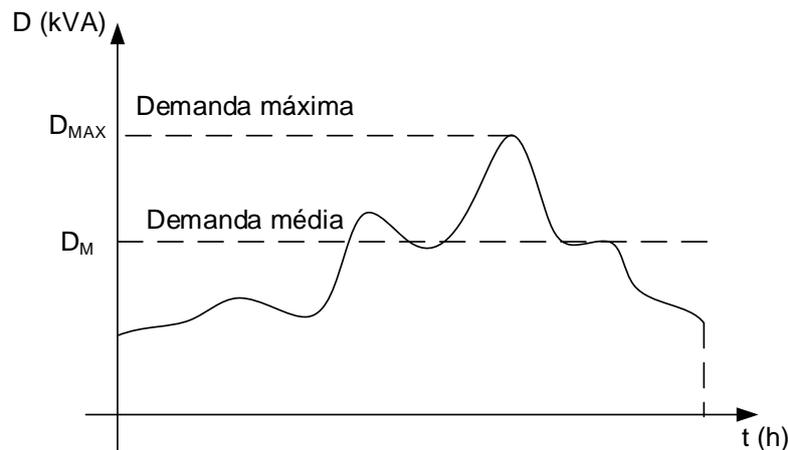
Fonte: O autor

## 5.8 INFLUÊNCIA DO CARREGAMENTO

A demanda típica de um alimentador durante um dia, pode ser analisada através da Figura 5.7. Nessa, pode-se perceber que o consumo não é constante, possuindo demandas mínimas e máximas que variam significativamente em relação à média. Como o instante do dia que a FAI irá ocorrer é desconhecido, é de grande importância avaliar o desempenho do método para faltas em diferentes situações de carregamento. Sendo assim, o algoritmo proposto foi avaliado para duas situações de carregamento do alimentador, sendo carregamento leve e pesado. O valor da carga utilizada para o carregamento pesado é a mesma fornecida para o sistema IEEE 34 barras (Apêndice A). Para carga leve, foi considerada a metade de cada uma das cargas desse mesmo sistema. As FAIs foram simuladas no solo tipo paralelepípedo e nos quinze nós da Tabela 5.1.

A Figura 5.8 apresenta o erro na estimação da distância da FAI para os dois níveis de carregamento considerados.

Figura 5.7 - Curva de carga típica

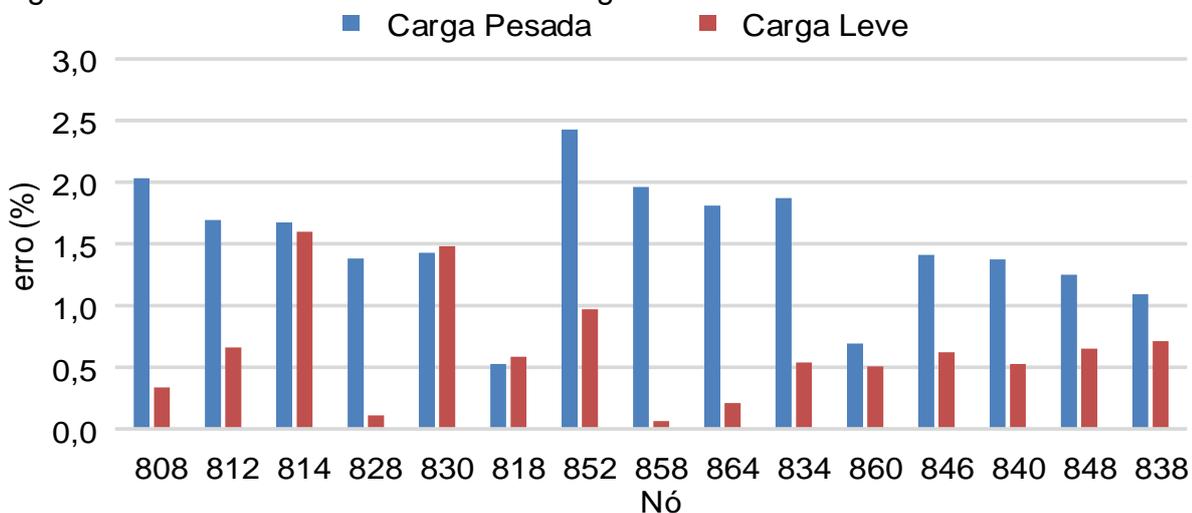


Fonte: O autor

Através da análise da Figura 5.8, pode-se perceber que, de modo geral, o algoritmo apresentou melhores resultados para carregamento leves. Isso pode ser explicado pela presença de cargas nos ramais laterais entre a subestação e ponto de falta. No modelo proposto nesse trabalho, considera-se que todas essas cargas estão após o ponto de falta. Essa consideração é geradora de erro na estimação do local da FAI e, por isso, quanto menor a carga nos ramais entre a subestação e o ponto de falta, menor o erro na estimação da distância da FAI.

Apesar do erro ter aumentado com o nível de carregamento do alimentador, o maior erro obtido nessas simulações foi de 2,4% para uma FAI no nó 852, distante 52713 m da subestação.

Figura 5.8 - Análise da influência do carregamento do alimentador



Fonte: O autor

### 5.9 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O MÉTODO PROPOSTO E IURINIC, OROZCO E BRETAS (2015)

Nesse item, é apresentada uma análise comparativa entre o desempenho obtido pelo método proposto e pela metodologia apresentada em Iurinic, Orozco e Bretas (2015). Existem outros métodos na literatura que também apresentam bons resultados, entretanto são difíceis de serem reproduzidos. Além disso, métodos que utilizam múltiplos pontos de medição ou frequências de amostragem muito elevadas, normalmente apresentarão vantagens sobre métodos que não possuem essas características. Entretanto, para se obter essas vantagens são necessários altos investimentos. Sendo assim, Iurinic, Orozco e Bretas (2015) foi selecionado para comparação, pois possui características similares à do método proposto nesse trabalho como, por exemplo, medição em apenas um terminal, não necessita de treinamento e possui frequência de amostragem compatível com os relés modernos.

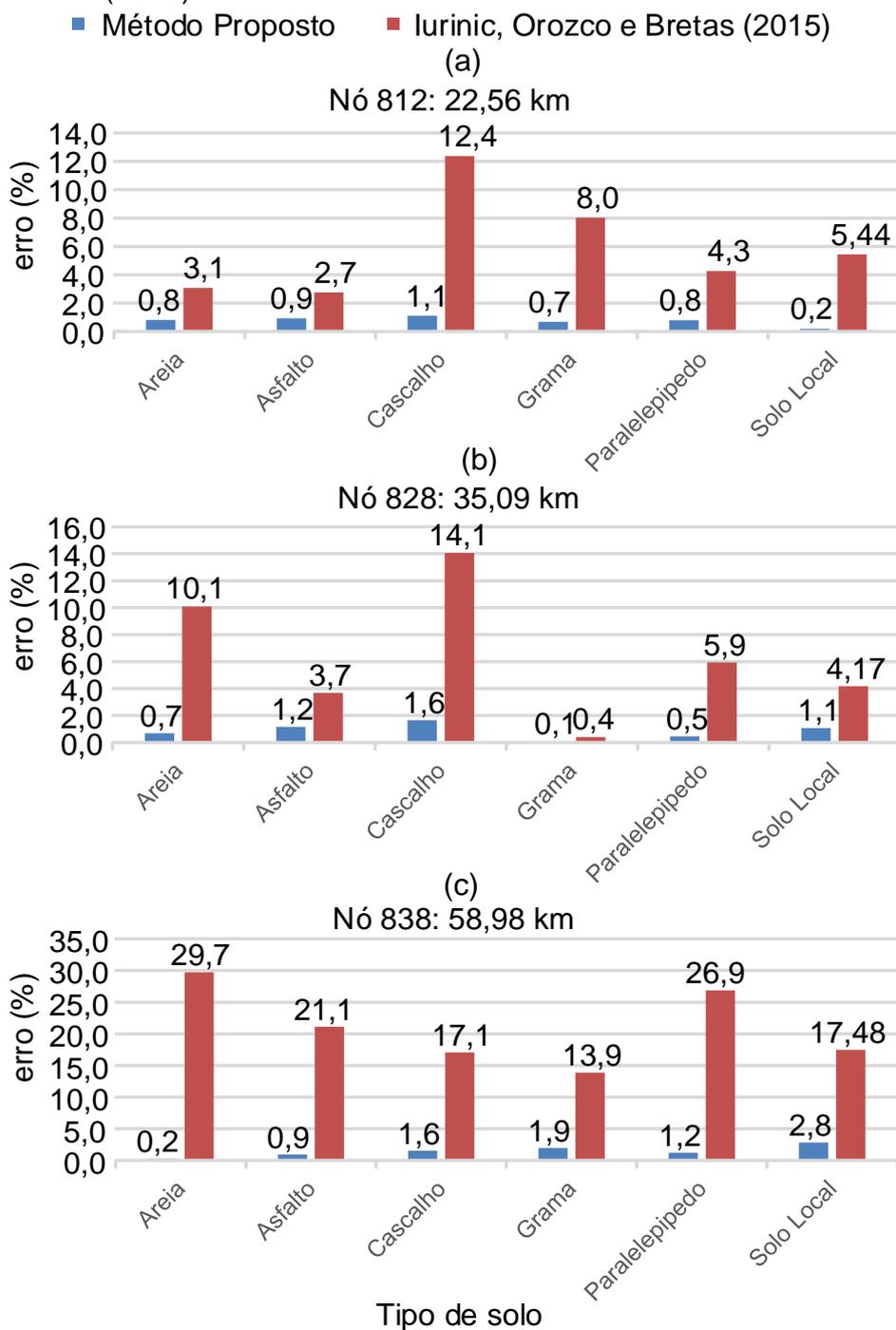
Para análise do desempenho dos dois métodos, foram simuladas FAIs, nos diferentes tipos de solos, nos nós 812, 828 e 838 do sistema teste da Figura 5.1. Através desses nós, é possível realizar uma análise do desempenho dos métodos diante de faltas a distâncias curtas, médias e longas em relação a subestação. Além disso, também é possível verificar o comportamento dos métodos para FAIs que incidiram em diferentes tipos de superfícies.

Para essa análise, vale salientar que quando aplicadas as equações propostas nesse trabalho e por Iurinic, Orozco e Bretas (2015), foi utilizada a corrente no ponto de falta obtida através de simulação no software ATPDraw. Dessa forma, o erro gerado pela estimação dessa variável não irá influenciar nos resultados obtidos. Além disso, os dois métodos utilizam a mesma metodologia para estimação da corrente no ponto de falta, por isso não sendo necessário comparar as metodologias.

A Figura 5.9a apresenta o erro percentual obtido pelos dois métodos para FAIs a 22,56 km da subestação (nó 812). Através da análise dessa figura, pode-se perceber que o método proposto nesse trabalho obteve melhores resultados independentemente do tipo de solo em que a FAI incidiu. O método proposto em Iurinic, Orozco e Bretas (2015) não obteve resultados satisfatórios em todos os tipos de superfícies. Isso pode ser explicado pelo fato de que, para calcular a tensão no ponto de falta, Iurinic, Orozco e Bretas (2015) utiliza um equacionamento com base no modelo apresentado em Emanuel et al. (1990) para simular as FAIs. Esse modelo,

por sua vez, foi proposto para representar a curva  $V \times I$  no ponto de falta durante uma FAI em um solo arenoso, não representando de forma adequada a assimetria das curvas  $V \times I$  dos outros tipos de solos.

Figura 5.9 - Análise comparativa entre o método proposto nesse trabalho e Iurinic, Orozco e Bretas (2015)



Fonte: O autor

As Figuras 5.9b e 5.9c também apresentam os erros percentuais obtidos pelos dois métodos, entretanto a distância de incidência das FAIs foi alterada para 35,1 km (nó 828, Figura 5.9b) e 58,98 km (nó 838, Figura 5.9c). Como pode ser observado, o método proposto nesse trabalho obteve melhores resultados em todos tipos de solos, independentemente da distância e do tipo de solo de incidência da FAI. Também se pode verificar que a diferença entre os erros obtidos pelos dois métodos fica mais evidente conforme a distância da FAI aumenta, já que o erro gerado por Iurinic, Orozco e Bretas (2015) aumenta consideravelmente com a distância da falta, enquanto o gerado pelo método proposto nesse trabalho permanece relativamente estável.

Essa diferença de desempenho, quando considerada a distância de incidência da FAI, pode ser explicada pelo fato de que conforme a distância da falta aumenta, a tensão no ponto de falta e, conseqüentemente, a amplitude da corrente nesse ponto reduz. Isso influencia nos resultados de Iurinic, Orozco e Bretas (2015), pois o cálculo da tensão no ponto de falta proposto por Iurinic, Orozco e Bretas (2015) depende da estimação das quedas de tensão nos resistores e indutores fixos do modelo de FAI utilizado. Assim, uma menor corrente no ponto de falta faz com que as quedas de tensão nesses componentes sejam menores, tornando os erros na estimação desses componentes e da distância da falta mais significativos. Já o modelo proposto nesse trabalho não é influenciado significativamente pela amplitude da corrente e da tensão no ponto de falta, pois é a curva  $V \times I$  que é o objeto modelado e não o circuito elétrico utilizado para simular as FAIs.

Sendo assim, através dos resultados obtidos, pode-se concluir que o método proposto nesse trabalho é robusto, visto que estima a distância de incidência de FAIs em diferentes tipos de solos e com menores erros que os apresentados por Iurinic, Orozco e Bretas (2015).

## 5.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo apresentou os resultados e discussões das simulações realizadas para validar o método proposto. No primeiro momento, um caso de FAI foi utilizado para detalhar todas as etapas do método proposto. No segundo momento, o desempenho do método foi analisado diante da variação no tipo de solo, ângulo de incidência da falta e carregamento do alimentador. Além disso, a metodologia de estimação da corrente no ponto de falta também foi avaliada. Por fim, foi apresentada

uma análise comparativa entre o desempenho do método proposto e o de um método recentemente publicado na literatura.

A avaliação da influência do tipo de solo, no desempenho do método, demonstrou a robustez da metodologia proposta, pois o algoritmo foi capaz de manter o erro de estimação abaixo de 4% em todos os solos testados. Esse erro é considerado satisfatório quando comparado a outros trabalhos publicados na literatura técnica, sendo inferior, inclusive, que os erros obtidos por métodos que consideram apenas um tipo de solo. Sendo assim, o método proposto se mostrou capaz de localizar FAIs em diferentes tipos de superfícies diferentemente dos métodos de localização existentes na literatura.

O desempenho da metodologia de estimação da corrente no ponto de falta também foi avaliado. Através dessa análise, pode-se perceber que os erros de estimação são menores quando a corrente no ponto de falta simulada é utilizada, ratificando que o equacionamento apresentado para modelar o comportamento do alimentador durante FAIs é adequado. Entretanto, quando a corrente no ponto de falta é estimada através da metodologia proposta na seção 4.3.2, os erros aumentam, entretanto, permanecem próximos daqueles obtidos quando foi utilizada a corrente no ponto de falta simulada. Dessa maneira, considerando os erros obtidos, a simplicidade da metodologia e o fato de não necessitar da instalação de equipamentos adicionais de medição, pode-se considerar que a metodologia proposta para estimar a corrente no ponto de falta é satisfatória para determinação da distância de incidência de FAIs.

Através das simulações realizadas para avaliar a influência do ângulo de incidência da falta, pôde-se observar que o algoritmo proposto não foi afetado de forma significativa. Essa característica se deve ao fato de que o método inicia o processo de estimação da distância da FAI sempre a partir da primeira amostra do semiciclo positivo da tensão da fase em falta. Essa metodologia faz com que o instante de incidência do curto-circuito não interfira significativamente nos resultados da estimação da distância do curto-circuito.

As variações no carregamento do alimentador influenciaram na estimação da distância da falta, sendo que o algoritmo obteve melhores resultados para menores carregamentos. Isso pode ser explicado pelo fato de que o modelo proposto nesse trabalho considera que, após o início da FAI, todas as cargas do alimentador estão concentradas após o ponto de falta. Como essa consideração é uma simplificação, isso acaba por gerar erros na estimação da distância da FAI. Esses erros são mais

significativos quando a carga entre a subestação e o ponto de falta é mais elevada, ou seja, quando o carregamento do alimentador é maior. Apesar do aumento do erro, devido a variação no carregamento, o algoritmo obteve resultados satisfatórios, sendo que em 93% dos casos testados com carregamento pesado e solo tipo paralelepípedo o erro foi inferior a 2%.

Por fim, quando o desempenho do método proposto nesse trabalho foi comparado ao de outra metodologia recentemente publicada na literatura, obteve melhores resultados em todos os casos testados. A variação da distância de incidência da FAI, assim como o tipo de superfície em que ela incidiu, afetaram significativamente o método de Iurinic, Orozco e Bretas (2015), gerando erros superiores a 25% em alguns casos. Já o método proposto nesse trabalho se mostrou bastante robusto, pois estimou a distância das FAIs em diferentes tipos de solos mantendo uma precisão satisfatória. Além disso, mesmo com o aumento da distância de incidência das FAIs, os erros permaneceram abaixo de 3,1%.



## 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho propôs um novo método para localização de FAIs em redes aéreas de distribuição. A principal originalidade do método é a utilização de uma única função matemática para modelar a relação  $V \times I$  no ponto de falta durante FAIs em diferentes tipos de solos. Além disso, a metodologia utiliza uma RNA para estimação dos parâmetros desconhecidos das equações que modelam o comportamento do alimentador durante as FAIs. Para isso, essa RNA é treinada de forma contínua e, somente, após o início da FAI. Outro diferencial do método é a utilização dos dados de tensão e corrente medidos a um terminal. Esses dados são adquiridos através de uma frequência de amostragem adequada a realidade dos relés instalados nas subestações. Essas características fazem com que não sejam necessários ajustes prévios no algoritmo, bastando que o método tenha acesso aos parâmetros da rede, através do banco de dados da concessionária, e aos sinais de tensão e corrente oriundos do relé já instalado na subestação.

Devido a essas características, e a utilização de um equacionamento no domínio do tempo, o método pode ser utilizado em um computador junto a subestação ou centro de operação, assim se tornando uma alternativa de baixo custo para localização de FAIs em redes de distribuição.

O desempenho da metodologia proposta foi avaliada diante de diferentes situações. O ângulo de incidência da falta não interferiu de forma significativa na estimação da distância da FAI. Os testes realizados com diferentes tipos de solos demonstraram a robustez do método, pois o algoritmo proposto obteve erros inferiores a 4%, independentemente do tipo de solo em que a FAI incidiu. Além disso, em 90% dos casos testados o erro permaneceu abaixo de 3%. Esses erros são satisfatórios quando comparados a outros métodos propostos na literatura, mesmo aqueles que consideram apenas um tipo de superfície para incidência das FAIs.

A eficácia da metodologia de estimação da corrente no ponto de falta também foi testada. O algoritmo obteve erros maiores quando a corrente no ponto de falta foi estimada. Entretanto, apesar do aumento do erro, esses permaneceram próximos daqueles obtidos quando foi utilizada a corrente no ponto de falta simulada. Sendo assim, com base nos resultados obtidos, a simplicidade de implementação e baixo custo financeiro e computacional, pode-se considerar satisfatória a metodologia utilizada para estimar a corrente no ponto de falta.

De modo geral, o método apresentou melhores resultados com carregamentos leves. Essa característica se deve a consideração de que todos ramais laterais estarão a jusante do ponto de falta após o início da FAI. Essa simplificação, apesar de acrescentar erros no método, é considerada válida, pois permite que sejam realizadas medições apenas na subestação, não sendo necessário o conhecimento das correntes e tensões nas cargas entre a subestação e o ponto de falta. Além disso, mesmo com essa simplificação, os resultados obtidos na estimação da distância da FAI são satisfatórios quando comparados a outros métodos publicados na literatura.

Quando comparado a outro método recentemente publicado na literatura, a metodologia proposta nesse trabalho mostrou não ser influenciada, de forma significativa, pela distância de incidência da FAI, nem pelo tipo de superfície em que essa incidiu, obtendo erros inferiores a 3,1%. Já o método de Lurinic, Orozco e Bretas (2015), mostrou-se sensível a essas variáveis, obtendo erros superiores a 25% para alguns tipos de solos.

Sendo assim, os bons resultados obtidos nas simulações, baixo custo e simplicidade de implementação, tornam o método apresentado nesse trabalho promissor para implementações reais.

## 6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros na área, são apresentadas as seguintes sugestões:

- Incorporar na metodologia proposta um algoritmo para detectar FAIs e assim tornar o método uma ferramenta completa para o problema das FAIs;
- Incluir uma metodologia para solução ou redução da múltipla estimativa;
- Validação da metodologia através de estudos de casos com base em dados obtidos de alimentadores reais;
- Aperfeiçoar a metodologia para estimação da corrente no ponto de falta;
- Analisar o impacto da geração distribuída no desempenho do método proposto para estimação da distância de incidência da FAI;
- Aprimorar o método de detecção de passagem por zero;
- Normalizar em pu o método de detecção do fim do período de *buildup*.

## 6.2 ARTIGOS ACEITOS OU PUBLICADOS DURANTE O DOUTORADO

ROSSINI, J. P.; FARIAS, P. E.; MORAIS, A. P.; CARDOSO, G. JR.; COSTA, G. B. An Alternative Solution for the Multiple Estimation Problem using Fuzzy Sets, **International Conference on Environment and Electrical Engineering**, Junho, 2017.

FARIAS, P. E.; ROSSINI, J. P., MORAIS, A. P.; CARDOSO, G. JR. Fault Location in Distribution Systems: A method considering the parameter estimation using a RNA Online, **IEEE Latin America Transactions**, vol. 14, no. 12, pp. 4741-4749, Dezembro, 2016.

FARIAS, P. E.; ROSSINI, J. P., MORAIS, A. P.; CARDOSO, G. JR. Automated system for locating short circuits in distribution networks through the reactance and Fuzzy Logic, **The 13<sup>th</sup> IET International Conference on Developments in Power System Protection – DPSP**, Março, 2016.

FARIAS, P. E.; COSTA, G. B.; MORAIS, A. P.; CARDOSO, G. Jr. Revisão e análise das técnicas para localização de faltas em redes de distribuição de energia elétrica, **International Conference on Electricity Distribution – CIDEL**, Argentina, 2014.

FARIAS, P. E.; MORAIS, A. P.; CARDOSO, G. JR.; OLIVEIRA, A. L. Transients detection and classification in distribution networks for high impedance faults identification, **49<sup>th</sup> International Universities Power Engineering Conference (UPEC)**, pp. 1-6, Setembro, 2014.



## REFERÊNCIAS

ALAMUTI, M. M. et al. Intermittent fault location in distribution feeders. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 27, n. 1, p. 96–103, Janeiro 2012.

ALI, M. S. et al. High-impedance fault locations using matching technique and wavelet transform for underground cable distribution network. **IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering**, v. 9, p. 176–182, Março 2014.

ASLAN, Y. An alternative approach to fault location on power distribution feeders with embedded remote-end power generation using artificial neural networks. **Electrical Engineering**, v. 94, n. 3, p. 125–134, Setembro 2012.

BAKAR, A. H. A. et al. High impedance fault location in 11kv underground distribution systems using wavelet transforms. **Electrical Power and Energy Systems**, v. 55, p. 723–730, Fevereiro 2013.

BISCARO, A. A. P. et al. Integrated fault location and power-quality analysis in electric power distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 31, n. 2, Abril 2016.

BORGHETTI, A.; BOSETTI, M.; SILVESTRO, M. D. Continuous-wavelet transform for fault location in distribution power networks: Definition of mother wavelets inferred from fault originated transients. **IEEE Transactions on Power System**, v. 23, n. 2, p. 380–388, Maio 2008.

BORGHETTI, A. et al. On the use of continuous-wavelet transform for fault location in distribution power systems. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 28, n. 9, p. 608–617, Março 2006.

BRAHMA, S. M. Fault location in power distribution system with penetration of distributed generation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 26, n. 3, p. 1545–1553, Julho 2011.

BRETAS, A. S. et al. A novel high impedance fault location for distribution systems considering distributed generation. In: **IEEE/PES transmission & distribution conference and exposition: latin america**. 2006.

CAMPOCCIA, A. et al. An efficient diagnostic technique for distribution systems based on under fault voltages and currents. **Electric Power Systems Research**, v. 80, p. 1205–1214, 2010.

CESP, **Subestação de Conchas – Ensaio de Curto-Circuito: Parte-I. Ilha Solteira**, 1985.

CPFL. **Proteção de redes aéreas de distribuição – sobrecorrente – GED2912**, CPFL Energia, Norma Técnica, 2006.

**Distribution System Analysis Subcommittee. IEEE 34 Node Test Feeder.** Disponível em: <<http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/index.html>>. Acessado em: 10 de junho 2017

Djuric, M. B.; Terzija, V. V. A new approach to the arcing faults detection for fast autoreclosure in transmission systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 10, n. 4, p. 1793-1798, Outubro 1995.

Djurić, M. B.; Radojević, Z. M.; Terzija, V. V. Digital signal processing algorithm for arcing faults detection and fault distance calculation on transmission lines. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 19, n. 3, p. 165–170, Março 1997.

ELKALASHY, N. I. et al. Dwt-based detection and transient power direction-based location of high-impedance faults due to leaning trees in ungrounded mv networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 23, n. 1, p. 94–101, Janeiro 2008.

EMANUEL, A. E. et al. High impedance fault arcing on sandy soil in 15 kV distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 5, n. 2, p. 676–686, Abril 1990.

ESPINAL, C. G.; FLOREZ, J. M.; LONDONO, P. S. Advanced fault location strategy for modern power distribution systems based on phase and sequence components and the minimum fault reactance concept. **Electric Power System Research**, v. 140, p. 933–941, Novembro 2016.

FANUCCHI, R. Z. **A detecção e a localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição utilizando transformadas Wavelets e Redes Neurais Artificiais.** Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2014.

FERRAZ, G. R. et al. Arc fault location: A nonlinear time varying fault model and frequency domain parameter estimation approach. **Electrical Power and Energy Systems**, v. 80, p. 347–355, Setembro 2016.

FLAUZINO, R. A. **Identificação e localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição baseadas em decomposição por componentes ortogonais e inferência Fuzzy.** Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2007.

FLOREZ, J. M.; NUNEZ, V. B.; CAICEDO, G. C. Fault location in power distribution systems using a learning algorithm for multivariable data analysis. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 22, n. 3, p. 1715–1721, Julho 2007.

GAUDARZI, M. et al. Improved fault location algorithm for radial distribution systems with discrete and continuous wavelet analysis. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 67, p. 423–430, Maio 2015.

GAZZANA, D. S. et al. An integrated technique for location and section identification in distribution systems. **Electric Power Systems Research**, v. 115, p. 65–73, Outubro 2014.

GOHAKAR, V. N.; KHEDKAR, M. K. Faults locations in automated distribution system. **Electric Power Systems Research**, v. 75, p. 51–55, Julho 2005.

HAN, F. et al. Locating phase-to-ground short-circuit faults on radial distribution lines. **IEEE Transactions Industrial Electronics**, v. 54, n. 3, p. 1581–1590, Junho 2007.

HAYKIN, S. **Neural Networks: a comprehensive foundation**. 2. ed. Pearson Prentice Hall, 1999.

HONG, Y. Y.; HUANG, W. S. Locating high-impedance fault section in electric power systems using wavelet transform, k-means, genetic algorithms, and support vector machine. **Hindawi Publishing Corporation**, Novembro 2014.

HOSSAIN, S.; ZHU, H.; OVERBYE, T. Distribution high impedance fault location using localized voltage magnitude measurements. **North American Power Symposium (NAPS)**, Setembro 2014.

HOU, D. Detection of high-impedance faults in power distribution systems. **Schweitzer Engineering Laboratories**, 2007.

IURINIC, L. U.; OROZCO, A. H.; BRETAS, A. Distribution systems high impedance fault location: a parameter estimation approach. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 31, n. 4, p. 1806–1814, Dezembro 2015.

IURINIC, L. U. **Localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia elétrica: uma abordagem baseada na estimação de parâmetros associados a modelos no domínio do tempo**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

JAMALI, S.; BAHMANYAR, A. A new fault location method for distribution networks using sparse measurements. **Electrical Power and Energy Systems**, v. 81, p. 459–468, Outubro 2016.

JEERING, D. I.; LINDERS, J. R. Ground resistance-revisited. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 4, n. 2, p. 949–956, Abril 1989.

JIA, K. et al. Ground fault location using the low-voltage-side recorded data in distribution systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 51, n. 6, p. 4994–5001, Dezembro 2015.

KERSTING, W. **Distribution System Modeling and Analysis**. CRC Press, 2002.

LIAO, Y. Generalized fault-location methods for overhead electric distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 26, n. 1, p. 53–64, Janeiro 2011.

MARQUARDT, D. W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. **Jornal of the Society for Industrial and Applied Mathematics**, v. 11, n. 2, p. 431–441, Junho 1963.

MATOS, E. R. **Um método para detecção e classificação de curtos-circuitos em redes de distribuição de energia elétrica baseado na Transformada de Fourier e em Redes Neurais**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.

MILIOUDIS, A. N.; ANDREOU, G. T.; LABRIDIS, D. P. Detection and location of high impedance faults in multiconductor overhead distribution lines using power line communication devices. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 6, n. 2, Março 2015.

MORETO, M. **Localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia: uma metodologia baseada em redes neurais**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

NAKAGOMI, R. M. **Proposição de um Sistema para Simulação de Faltas de Alta Impedância em Redes de Distribuição**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

NAN, S. R. et al. A modeling method of a high impedance fault in a distribution system using two series time-varying resistances in emtp. **Summer Meeting 2001: IEEE Pres**, v. 2, p. 1175–1180, 2001.

RAMAR, K.; NGU, E. E. A new impedance-based fault location method for radial distribution systems. **Power Energy Society General Meeting**, p. 1–9, Julho 2010.

Russel, B. D. Detection of downed conductors on utility distributions systems, **IEEE PES Tutorial Course 90EH0310-3-PWR**, 1989.

SADEH, J.; BAKHSHIZADEHB, E.; KAZEMZADEHB, R. A new fault location algorithm for radial distribution systems using modal analysis. **Electrical Power and Energy Systems**, v. 45, n. 1, p. 271–278, Fevereiro 2013.

SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOLOWSKI, E. **Fault Location on Power Networks**. Polônia: Springer Science & Business Media, 2010.

SALIM, R. H. **Novos desenvolvimentos na localização de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica fundamentada na impedância**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

SANTOS, W. C. et al. High impedance faults: From field tests to modeling. **Journal of Control, Automation and Electrical System**, v. 24, p. 885–896, Setembro 2013.

SANTOS, W. C. et al. High impedance fault detection and location based on electromagnet transients analysis. In: **International Conference on Power Systems Transients – IPST**. Vancouver, Julho 2013.

SEL. **SEL-351A Protection System**, 2015. Manual de dados.

SENGER, E. C. et al. Automated fault location system for primary distribution networks. **IEEE Transactions on Power Deliver**, v. 20, n. 2, p. 1332–1340, Abril 2005.

SHARAF, A. M.; WANG, G. High impedance fault detection using feature-pattern based relaying. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 1, p. 222–226, Setembro 2003.

SHORT, T. A. **Electric Power Distribution Handbook**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2003.

SILVA, J. A. C. B. et al. High impedance fault location – case study with developed models from field experiments. In: **21st International Conference on Electricity Distribution**. Frankfurt 2011.

TENG, H. J.; HUANG, W. H.; LUAN, S. W. Automatic and fast faulted line-section location method for distribution systems based on fault indicators. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 29, n. 4, p. 1653–1662, Julho 2014.

TENGDIN, J. et al. High impedance fault detection technology. **Report of PSRC Working Group D15**, Março 1996.

URIARTE, F. M. **Modeling, detection, and localization of high-impedance faults in low-voltage distribution feeder**. Dissertação (Mestrado) — Faculty of the Virginia Tech Polytechnic Institute and State University, 2003.

VIANA, J. T. A.; ARAUJO, L. R.; PENIDO, D. R. R. High impedance fault area location in distribution system based on current zero sequence component. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 2, p. 759–766, Fevereiro 2016.

WESTER, C. G. High impedance fault detection on distribution systems. **GE Power Management**, Abril 1998.

XIANGHUN, Z.; LI, K. K.; CHAN, W. L. Wavelet analysis based protection for high impedance ground fault in supply systems. In: **International Conference on Power System Technology**. China 2002.

ZAYANDEHROODI, H. et al. An optimal radial basis function neural network for fault location in a distribution network with high penetration of dg units. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 46, n. 9, p. 3319–3327, Maio 2013.

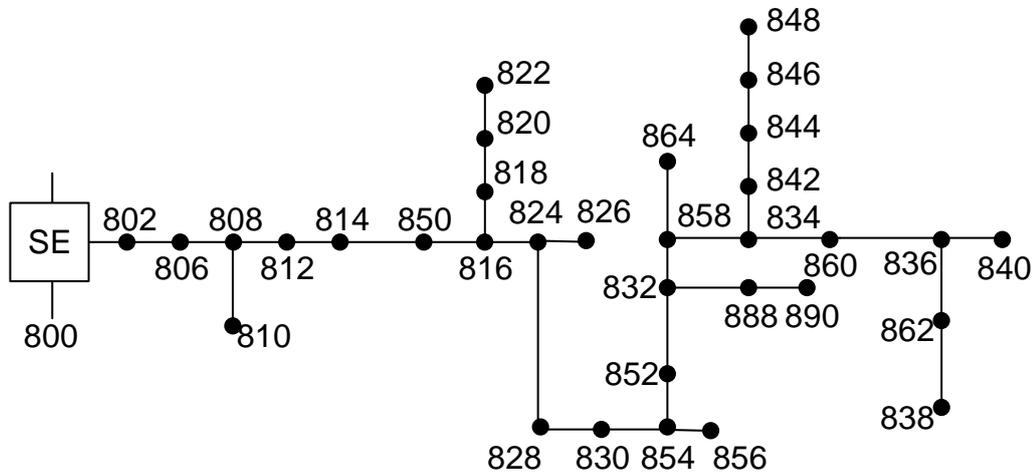
ZHOU, J. et al. High-performance arcing-fault location in distribution networks. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 48, n. 3, p. 1107–1114, Maio 2012.



## APÊNDICES

### APÊNDICE A – Parâmetros utilizados no sistema teste IEEE 34 barras

Este apêndice apresenta os parâmetros aplicados no sistema teste IEEE 34 barras simplificado. Todas as cargas do alimentador foram modeladas como impedância constante, sendo que a tensão de linha do alimentador foi alterada para 13,8 kV. Os reguladores de tensão e o transformador presente entre os nós “832” e “888” foram retirados do sistema. Todos os trechos do alimentador foram considerados com a mesma configuração de condutores, entretanto o número de fases (monofásico, bifásicos ou trifásico) do alimentador foi variado.



Fonte: Adaptado de *Distribution System Analysis Subcommittee. IEEE 34 Node Test Feeder*

Figura A 1 - Sistema teste utilizado neste trabalho

Tabela A. 1 - Tipos de configuração do sistema teste

Configuração	Seqüência de fase	Condutor
300	BAC	1/0
302	A	1/0
303	B	1/0

Fonte: Adaptado de *Distribution System Analysis Subcommittee. IEEE 34 Node Test Feeder*

#### Configuração 300

$$Z = \begin{bmatrix} 0,83+0,83j & 0,13+0,35j & 0,13+0,31j \\ 0,13+0,35j & 0,82+0,84 & 0,12+0,12j \\ 0,13+0,31j & 0,12+0,12j & 0,82+0,83j \end{bmatrix} \Omega / \text{km}$$

$$Y = \begin{bmatrix} 3,31 & -0,95 & -0,6 \\ -0,95 & 3,1 & -0,3 \\ -0,6 & -0,3 & 3,03 \end{bmatrix} \mu\text{S/km}$$

## Configuração 302

$$Z = \begin{bmatrix} 0,83+0,83j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Omega/\text{km}$$

$$Y = \begin{bmatrix} 3,31 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mu\text{S/km}$$

## Configuração 303

$$Z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,82+0,84j & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Omega/\text{km}$$

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3,1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mu\text{S/km}$$

Tabela A. 2 - Parâmetros do transformador

MVA	Tensão de Alta (kV)	Tensão de baixa (kV)	R (%)	X (%)
2,5	69	13,8	1	8

Fonte: Adaptado de *Distribution System Analysis Subcommittee. IEEE 34 Node Test Feeder*

Tabela A. 3 - Configuração para cada nó do sistema teste

Nó A	Nó B	Comprimento (m)	Configuração	Nó A	Nó B	Comprimento (m)	Configuração
800	802	786,384	300	834	860	615,696	300

Nó A	Nó B	Comprimento (m)	Configuração	Nó A	Nó B	Comprimento (m)	Configuração
802	806	527,34	300	834	842	85,344	300
806	808	9823,704	300	836	840	262,128	300
808	810	1769,05	303	836	862	85,344	300
808	812	11430	300	842	844	411,48	300
812	814	9061,704	300	844	846	1109,472	300
814	850	3,048	300	846	848	161,544	300
816	818	521,208	302	850	816	98,488	300
816	824	3112,008	300	852	832	3,048	300
818	820	14676,12	302	854	856	7110,984	303
820	822	4187,952	302	854	852	11225,784	300
824	826	923,544	303	858	864	493,776	302
824	828	256,032	300	858	834	1776,984	300
828	830	6230,112	300	860	836	816,864	300
830	854	158,496	300	862	838	1481,328	303
832	858	1493,52	300	888	890	3218,688	300
832	888	1	300				

Fonte: Adaptado de *Distribution System Analysis Subcommittee. IEEE 34 Node Test Feeder*

Tabela A. 4 – Cargas por nó

Nó	Modelo de Carga	A		B		C	
		R ( $\Omega$ )	X <sub>L</sub> ( $\Omega$ )	R ( $\Omega$ )	X <sub>L</sub> ( $\Omega$ )	R ( $\Omega$ )	X <sub>L</sub> ( $\Omega$ )
806	Y-Z	0	0	1933	1082	1692	847
810	Y-Z	0	0	3174	1587	0	0
820	Y-Z	1493	746	0	0	0	0
822	Y-Z	370	192	0	0	0	0
824	Y-Z	0	0	10944	4377	0	0
826	Y-Z	0	0	1269	635	0	0
828	Y-Z	0	0	0	0	12696	6347
830	D-Z	15235	7617	15235	7617	6566	2626
830	Y-Z	7661	3283	0	0	0	0
856	Y-Z	0	0	12696	6347	0	0
858	Y-Z	25392	12696	25392	12696	8463	4231
864	Y-Z	25392	12696	0	0	0	0
834	Y-Z	12696	6347	3294	1757	3785	2038
860	Y-Z	3174	1587	2539	1269	461	230
860	D-Z	1935	1548	1935	1548	1935	1548
838	Y-Z	0	0	1813	906	0	0
840	Y-Z	2821	1410	2308	1154	0	0

Nó	Modelo de Carga	A		B		C	
		R ( $\Omega$ )	X <sub>L</sub> ( $\Omega$ )	R ( $\Omega$ )	X <sub>L</sub> ( $\Omega$ )	R ( $\Omega$ )	X <sub>L</sub> ( $\Omega$ )
840	D-Z	4394	3418	4394	3418	4394	3418
836	Y-Z	1692	847	4667	2800	1186	621
844	D-Z	292,98	227,87	292,98	227,87	292,98	227,87
844	Y-Z	5389	2994	0	0	0	0
846	Y-Z	0	0	2063	990	2436	1340
848	D-Z	5806	4644	5806	4644	5806	4644
848	Y-Z	0	0	2246	1074	0	0

Fonte: Adaptado de *Distribution System Analysis Subcommittee. IEEE 34 Node Test Feeder*

**Apêndice B - Magnitude dos pontos das curvas V x I dos diferentes tipos de solos**

Quadro B. 1 - Magnitude dos pontos da curva V x I do solo tipo areia

Areia			
Ascendente		Descendente	
Corrente (pu)	Tensão (pu)	Corrente (pu)	Tensão (pu)
-0,94779	-0,99731	-0,927	-0,99635
-0,90452	-0,98705	-0,92143	-0,98611
-0,88017	-0,93346	-0,90112	-0,92995
-0,78731	-0,8753	-0,83281	-0,87945
-0,73232	-0,80803	-0,75942	-0,81586
-0,71751	-0,73754	-0,59751	-0,74191
-0,53217	-0,63243	-0,56939	-0,66005
-0,3929	-0,54172	-0,43728	-0,57147
-0,29591	-0,44084	-0,34961	-0,47453
-0,22521	-0,32276	-0,23916	-0,3532
-0,10161	-0,20413	-0,1029	-0,2531
-0,02675	-0,10265	-0,02554	-0,13781
-0,0204	-0,03094	-0,01769	-0,00408
0,02	0,046	0,01	0,055
0,068944	0,149761	0,027007	0,116549
0,118681	0,269747	0,151067	0,237523
0,299207	0,379247	0,2551	0,347396
0,358154	0,485253	0,372684	0,45525
0,533153	0,585434	0,45052	0,558246
0,580097	0,670089	0,605902	0,656984
0,712513	0,750899	0,687008	0,736884
0,810668	0,819996	0,773758	0,81298
0,844003	0,892607	0,845352	0,883599
0,919008	0,931255	0,927825	0,945051
0,95152	0,963464	0,964149	0,971426
0,990796	0,999253	0,976193	0,99969

Fonte: O autor

Quadro B. 2 - Magnitude dos pontos da curva V x I do solo tipo asfalto

Asfalto			
Ascendente		Descendente	
Corrente (pu)	Tensão (pu)	Corrente (pu)	Tensão (pu)
-0,66	-1	-0,69	-1
-0,65107	-0,98062	-0,67755	-0,98764
-0,64454	-0,94735	-0,62433	-0,98578
-0,5774	-0,86683	-0,55423	-0,97555
-0,50728	-0,79008	-0,52859	-0,93477
-0,42707	-0,71031	-0,49102	-0,8819
-0,35873	-0,61624	-0,34194	-0,79732
-0,24359	-0,52886	-0,20478	-0,75351
-0,2272	-0,41892	-0,11652	-0,67648
-0,12462	-0,32267	-0,10282	-0,59506
-0,03872	-0,19912	-0,06598	-0,50461
-0,01234	-0,07091	-0,05515	-0,39409
0,033065	0,052643	-0,04872	-0,2724
0,040513	0,171816	-0,04005	-0,1507
0,055004	0,292123	-0,03735	-0,02778
0,059322	0,424927	0,030364	0,086751
0,081883	0,512515	0,08125	0,225816
0,101137	0,621793	0,15335	0,335634
0,16817	0,68334	0,236167	0,446687
0,203211	0,776288	0,295388	0,554762
0,276276	0,824019	0,367066	0,645538
0,418105	0,891846	0,455884	0,714606
0,558942	0,929528	0,46999	0,79763
0,586203	0,97311	0,56327	0,878109
0,630646	0,991871	0,63901	0,935037
0,657426	0,9967	0,657741	0,973188
0,66	0,998	0,682413	0,983571
0,67	1	0,69	1

Fonte: O autor

Quadro B. 3 - Magnitude dos pontos da curva V x I do solo tipo cascalho

Cascalho			
Ascendente		Descendente	
Corrente (pu)	Tensão (pu)	Corrente (pu)	Tensão (pu)
-0,75606	-0,91169	-0,79265	-0,91171
-0,73561	-0,88937	-0,73076	-0,89975
-0,63546	-0,82501	-0,64612	-0,89322
-0,52917	-0,79526	-0,60213	-0,87302
-0,41368	-0,70859	-0,52062	-0,82314
-0,29103	-0,62191	-0,42896	-0,75734
-0,19598	-0,52877	-0,31877	-0,69155
-0,0948	-0,42528	-0,20442	-0,64506
-0,05678	-0,28896	-0,13961	-0,57418
-0,01079	-0,17124	-0,08902	-0,48644
-0,0067	-0,03799	-0,05936	-0,39449
0,001079	0,074555	-0,05678	-0,28896
0,003683	0,193242	-0,0217	-0,16428
0,007848	0,315496	-0,01145	-0,04142
0,031481	0,427345	0,00242	0,094415
0,072581	0,509281	0,01185	0,224916
0,126672	0,588976	0,09019	0,350284
0,207464	0,661083	0,189503	0,458056
0,300684	0,716147	0,302758	0,564333
0,477803	0,763345	0,430135	0,653356
0,616598	0,803987	0,57065	0,727588
0,723284	0,849873	0,681176	0,793114
0,828934	0,88396	0,821404	0,851126
0,874509	0,907559	0,889212	0,878885
0,907863	0,925027	0,913336	0,915512

Fonte: O autor

Quadro B. 4 - Magnitude dos pontos da curva V x I do solo tipo paralelepípedo

Paralelepípedo			
Ascendente		Descendente	
Corrente (pu)	Tensão (pu)	Corrente (pu)	Tensão (pu)
-0,9545	-0,95754	-0,92831	-0,95909
-0,91092	-0,92697	-0,88696	-0,94046
-0,86504	-0,87952	-0,86063	-0,91232
-0,76229	-0,81972	-0,82119	-0,86844
-0,69875	-0,75197	-0,73607	-0,8193
-0,58631	-0,66668	-0,63088	-0,74997
-0,50948	-0,5886	-0,57788	-0,67407
-0,40562	-0,48646	-0,45148	-0,59681
-0,24796	-0,38262	-0,36869	-0,51388
-0,14769	-0,27688	-0,26333	-0,40957
-0,03723	-0,16283	-0,1696	-0,29515
-0,00281	-0,03308	-0,04352	-0,18102
0,022894	0,092236	-0,02407	-0,06947
0,105926	0,203166	0,023183	0,070246
0,217882	0,32204	0,114536	0,186651
0,343554	0,425519	0,238857	0,302077
0,430991	0,515752	0,339037	0,405176
0,536568	0,608934	0,439835	0,508233
0,605725	0,689666	0,579679	0,597474
0,705726	0,766465	0,641677	0,686395
0,766762	0,832805	0,751841	0,771583
0,823209	0,882269	0,833764	0,838043
0,930691	0,927059	0,917747	0,897981
0,949092	0,966159	0,953543	0,943372
0,984749	0,976649	0,973694	0,963655
		0,999907	0,964909

Fonte: O autor

Quadro B. 5 - Magnitude dos pontos da curva V x I do solo tipo grama

Grama			
Ascendente		Descendente	
Corrente (pu)	Tensão (pu)	Corrente (pu)	Tensão (pu)
-0,60089	-0,86111	-0,60089	-0,86111
-0,56002	-0,82989	-0,57562	-0,85563
-0,54565	-0,77824	-0,56002	-0,82989
-0,4967	-0,73226	-0,51034	-0,79151
-0,43428	-0,66869	-0,45716	-0,72972
-0,38039	-0,60284	-0,42278	-0,67472
-0,31319	-0,52485	-0,35542	-0,61016
-0,25631	-0,43982	-0,30693	-0,55629
-0,17143	-0,35536	-0,24417	-0,46838
-0,10231	-0,25017	-0,1822	-0,38478
-0,02917	-0,13661	-0,11757	-0,30024
0	0	-0,07129	-0,20893
0,009497	0,018513	-0,02819	-0,10421
0,041724	0,133833	0	0
0,077621	0,225245	0,002839	0,031445
0,139353	0,322205	0,059903	0,156698
0,15	0,35	0,133742	0,271462
0,207754	0,411066	0,211655	0,364951
0,269955	0,485061	0,292927	0,448388
0,335082	0,555357	0,349588	0,543736
0,391427	0,624727	0,36	0,56
0,457286	0,690398	0,426381	0,612886
0,510606	0,741168	0,48152	0,679819
0,554886	0,781978	0,535737	0,747583
0,596859	0,81929	0,581642	0,793194
0,61165	0,845776	0,617282	0,833391
0,636142	0,855353	0,637279	0,846565

Fonte: O autor

Quadro B. 6 - Magnitude dos pontos da curva V x I do solo tipo solo local

Solo Local			
Ascendente		Descendente	
Corrente (pu)	Tensão (pu)	Corrente (pu)	Tensão (pu)
-0,61914	-0,84354	-0,64889	-0,84444
-0,60602	-0,81562	-0,63593	-0,82801
-0,58839	-0,79202	-0,58691	-0,80338
-0,50832	-0,7722	-0,52638	-0,79515
-0,41975	-0,73174	-0,4602	-0,75836
-0,32615	-0,65561	-0,36523	-0,69593
-0,23506	-0,60663	-0,26528	-0,65839
-0,13306	-0,51331	-0,15528	-0,62739
-0,04195	-0,38919	-0,08149	-0,61368
-0,02	-0,21371	-0,05093	-0,55346
-0,015	-0,15	-0,02226	-0,47656
-0,01	-0,0777	-0,02223	-0,37465
-0,005	-0,01	-0,02197	-0,26211
0,001	0,004504	-0,015	-0,13896
0,01	0,0777	-0,01	-0,01278
0,013161	0,290088	0,005	0,009
0,027579	0,407631	0,01	0,125433
0,030443	0,495956	0,016975	0,326099
0,06147	0,567666	0,126154	0,455313
0,109046	0,592153	0,233632	0,533979
0,201439	0,630631	0,345779	0,598087
0,312448	0,654243	0,449195	0,670306
0,421834	0,706611	0,543523	0,718645
0,506582	0,760078	0,620382	0,768192
0,569599	0,800869	0,695684	0,795852
0,623055	0,821815	0,720664	0,823651
0,669992	0,827327		
0,713229	0,829312		

Fonte: O autor