UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LUIZ HENRIQUE PESSÔA DA COSTA TRONDOLI

Modelo Estocástico Parametrizável para o
Estudo de Falhas de Alta Impedância em
Sistemas de Distribuição de Energia
Elétrica

São Carlos
2017

LUIZ HENRIQUE PESSÔA DA COSTA TRONDOLI

Modelo Estocástico Parametrizável para o Estudo de Falhas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior

São Carlos
2017

Trata-se da versão corrigida da dissertação. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.

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

T852m Trondoli, Luiz Henrique Pessoa da Costa
Modelo Estocástico Parametrizável para o Estudo de
Faltas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição de
Energia Elétrica / Luiz Henrique Pessoa da Costa
Trondoli; orientador José Carlos de Melo Vieira Júnior.
São Carlos, 2017.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em
Sistemas Elétricos de Potência -- Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.

1. ATPDraw. 2. Detecção. 3. Falta de Alta
Impedância. 4. Modelamento 5. Proteção. 6. Sistemas de
Distribuição de Energia Elétrica. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **LUIZ HENRIQUE PESSÔA DA COSTA TRONDOLI**.

Título da dissertação: "Modelo estocástico parametrizável para o estudo de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia elétrica".

Data da defesa: 22/03/2017.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **José Carlos de Melo Vieira Junior**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Dr. **Benemar Alencar de Souza**
(Universidade Federal de Campina Grande/UFCG)

Aprovado

Dr. **Tiago Rodarte Ricciardi**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

Agradecimentos

Às minhas irmãs: Anna Carolina Pessoa da Costa Trondoli e Anna Júlia Pessoa da Costa Trondoli. Ao meu pai, Carlos Alberto Trondoli e em especial à minha mãe, Leila Pessoa da Costa, por seu amor incondicional.

Ao Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior pela orientação e confiança durante a elaboração deste trabalho.

À minha amiga e companheira, Lidiane Patricia Gonçalves, por seu constante apoio.

Aos meus amigos: Alexandre Vaz de Almeida, Carlos Alberto Breda Júnior, Epton Heringer, Gabriel Gravena Neves, Jader Fernando Dias Breda, Luis Paulo Faina Garcia, Sérgio Zauner Gimenes e Yuri Machioni.

Aos colegas da pós-graduação, pela amizade, discussões enriquecedoras e momentos de descontração.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) que de algum modo colaboraram com o desenvolvimento deste trabalho e com a minha formação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado.

Resumo

TRONDOLI, L. H. P. C. **Modelo Estocástico Parametrizável para o Estudo de Falhas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 165p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

As Falhas de Alta Impedância (FAI) causadas pelo rompimento de um condutor da rede primária podem trazer risco à segurança pessoal e ao patrimônio. A detecção deste defeito se faz, portanto, necessária. Não há na literatura um método que estabeleça a solução definitiva para este problema. Ainda, os estudos, quando não baseados em sinais reais, utilizam, por vezes, modelos determinísticos ou que não representam por completo as características geradas pelo defeito. Por este motivo, este trabalho propõe um modelo de falta de alta impedância que visa representar, com elevado detalhamento, a natureza do evento. O modelo desenvolvido é parametrizável para que possa representar as características dos sinais de falta e suas variações, inclusive as não determinísticas, as quais se referenciam na literatura, reproduzindo o comportamento típico de uma falta de alta impedância. O programa de simulação computacional empregado para este fim foi o ATPDraw. Para a validação do sinal gerado pelo modelo, além da comparação visual com sinais de falta reais, foi elaborado um algoritmo de detecção de FAI, o qual busca por características do fenômeno já conceituadas na literatura, com o propósito de analisar o sinal da corrente de falta gerado pelo modelo quando inserido em um sistema de distribuição de energia elétrica. Foi observada a progressão temporal do fenômeno, desde o rompimento do condutor até a formação dos arcos voltaicos. Do sinal de falta, em síntese, foram observadas características como: assimetria, variação de assimetria, ocorrência de *buildup*, presença e variação dos componentes harmônicos e inter-harmônicos. A observação dessa variedade de características é necessária na detecção de FAI e é coerente com o modelo proposto, já que este é o único presente na literatura capaz de reproduzi-las simultaneamente. Dos casos de falta simulados, todos foram detectados pelo algoritmo de detecção, indicando que os sinais de falta de alta impedância produzidos pelo modelo possuem as características que ele foi projetado para gerar.

Palavras-chave: ATPDraw, Detecção, Falta de Alta Impedância, Modelamento, Proteção, Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.

Abstract

TRONDOLI, L. H. P. C. **Parameterizable Stochastic Model for High Impedance Fault Study on Electrical Distribution Systems**. 165p. Dissertation (Master's Degree) - Engineering School of Sao Carlos, University of Sao Paulo, Sao Carlos, 2017.

High Impedance Faults (HIF) caused by primary conductor rupture can pose personal safety risk and danger to property. Detection of this event is, therefore, required. There is no proposed method in the literature that establishes a decisive solution to this problem. Studies, when not based on real signals, sometimes use deterministic models or models that do not entirely represent the event's characteristics. For this reason, this research proposes a high impedance fault model that intend to represent, with high level of details, the nature of this event. The developed model is parametrizable so it can represent fault signal characteristic and its variations, reproducing the typical high impedance fault behavior. The software ATPDraw was used for this purpose. For model's behavior and signal validation, in addition to visual comparison with real HIF signals, a detection algorithm was developed, which searches for HIF characteristics presented on literature, with the intent of analyzing the fault current signal generated by the model when inserted on an electrical distribution system. The temporal progression of the event was observed from the conductor rupture until electric arc ignition. From the fault current, characteristics such as: asymmetry, asymmetry variation, buildup, presence and variation of harmonic and inter-harmonic frequencies were analyzed. The evaluation of this variety of characteristics is needed for HIF detection and it only makes sense because the proposed model is the only one presented in literature capable of reproducing of all them simultaneously. All detection tests resulted in positive identification, confirming that the proposed HIF model possesses the intended characteristics.

Keywords: ATPDraw, Detection, High Impedance Fault, Modeling, Protection, Electrical Distribution Systems.

Lista de siglas

ABB	<i>Asea Brown Boveri</i>
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
AWG	<i>American Wire Gauge</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz
EAF	Espectro de Alta Frequência
EBF	Espectro de Baixa Frequência
FAI	Falta de Alta Impedância
GE	<i>General Electric</i>
IEE	Instituto de Energia e Ambiente
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IEIH	Índice de Existência de Componentes Inter-Harmônicos
KEPCO	<i>Korea Electric Power Corporation</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
TACS	<i>Transient Analysis of Control Systems</i>
TCF	Transformada Contínua de Fourier
TDF	Transformada Discreta de Fourier
TF	Transformada de Fourier
TW	Transformada Wavelet
TWC	Transformada Wavelet Contínua
STFT	<i>Short Time Fourier Transform</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
USP	Universidade de São Paulo

Lista de Símbolos

A	Amplitude da resistência exponencial de $r1$ [Ω]
b	Constante de crescimento
$cbup$	Número de ciclos de <i>buildup</i> , ou seja, número de ciclos até que a resistência $r1$ atinja o valor estipulado pela variável <i>erro</i> do bloco r1
$CH1$	Chave 1, em série com a fase e à jusante do ponto de falta
$CH2$	Chave 2, em derivação no ponto de falta
$ciclo$	Pulso de indicação de ocorrência de ciclo
$coff$	Número de ciclos entre a ignição de dois arcos consecutivos
con	Número de ciclos de duração do arco
ΔV	Variação de tensão [V]
$erro$	Porcentagem de A, na qual se considera que a exponencial atingiu seu valor final [%]
$freq$	Frequência do Gerador [Hz]
$g(t)$	Condutância do arco dependente do tempo [S]
$G(t)$	Condutância estacionária do arco [S]
l_p	Comprimento do arco [V]
$maxcic$	Número máximo de ciclos no qual o valor da resistência $r3$ persistirá antes de trocar de zona
$mincic$	Número mínimo de ciclos no qual o valor da resistência $r3$ persistirá antes de trocar de zona
$pz1r2$	Probabilidade da resistência $r2$ assumir um valor de resistência pertencente à zona 1
$pz2r2$	Probabilidade da resistência $r2$ assumir um valor de resistência pertencente à zona 2
$pz1r3$	Probabilidade da resistência $r3$ assumir um valor de resistência pertencente à zona 1
$pz2r2$	Probabilidade da resistência $r3$ assumir um valor de resistência pertencente à zona 2
$quad$	Indicação do quadrante da senoide no ponto de falta

$r1$	Primeira parcela da resistência controlada pelo modelo
$r2$	Segunda parcela da resistência controlada pelo modelo
$r3$	Terceira parcela da resistência controlada pelo modelo
req	Pulso de requisição de ciclos on e off
$semcic$	Pulso de indicação de ocorrência de semiciclo
$solo$	Tipo de solo no qual ocorre a falta: úmido, seco ou arenoso, escolhidos pelos valores 0, 1 e 2, respectivamente
$tromp$	Tempo de rompimento do condutor
$ttoque$	Tempo de toque do condutor no solo
u_p	Tensão por comprimento do arco [V/cm]
$vfalta$	Tensão no ponto de falta
vl	Tensão de linha [V]
vn	Valor de tensão da fonte CC de polaridade negativa do modelo
vp	Valor de tensão da fonte CC de polaridade positiva do modelo
$x(t)$	Sinal do domínio do tempo
$X(w)$	Sinal no domínio da frequência
$w(t - \tau)$	Função janela
$z2r2$	Porcentagem máxima de redução da resistência fixa da zona 0 ($r2z0fx$) em $r2$ Utilizada para o cálculo da resistência fixa da zona 2 ($r2z2fx$)
$z2r3$	Porcentagem máxima de elevação da resistência fixa da zona 0 ($r3z0fx$) em $r3$ Utilizada para o cálculo da resistência fixa da zona 2 ($r3z2fx$)
τ	Parâmetro de translação
s	Parâmetro de escala
ψ	Wavelet mãe

Lista de figuras

Figura 1 - Cabo danificado após choque entre fases. <i>Fonte:</i> [14].	32
Figura 2 - Rompimento de condutor. <i>Fonte:</i> [8].	33
Figura 3 - Forma de onda da corrente de cabo rebatendo no solo. <i>Fonte:</i> [8].	33
Figura 4 - Regiões do arco. <i>Adaptado de:</i> [46].	37
Figura 5 - Corrente e tensão de FAI em solo seco. <i>Fonte:</i> [55].	39
Figura 6 - Corrente de falta em cascalho fino. <i>Fonte:</i> [10].	40
Figura 7 - Corrente de falta em cascalho grosso. <i>Fonte:</i> [10].	40
Figura 8 - Comportamento aleatório da amplitude da corrente. <i>Fonte:</i> [55].	41
Figura 9 - Corrente instantânea de uma FAI. <i>Fonte:</i> [44].	41
Figura 10 - Fulgurito. Resultado da fusão da sílica em solo arenoso. <i>Fonte:</i> [58].	41
Figura 11 - Esquema elétrico e de medição dos ensaios de FAI. <i>Fonte:</i> [8].	49
Figura 12 - Corrente de falta. <i>Fonte:</i> [8].	50
Figura 13 - Curva $V \times I$ de FAI. <i>Fonte:</i> [8].	50
Figura 14 - Experimento de FAI em solo arenoso. <i>Fonte:</i> [4].	51
Figura 15 - Experimento de FAI em solo de terra. <i>Fonte:</i> [4].	51
Figura 16 - Experimento de FAI em galho. <i>Fonte:</i> [4].	52
Figura 17 - Experimento de FAI em folha. <i>Fonte:</i> [4].	52
Figura 18 - Diagrama do circuito da montagem laboratorial. <i>Fonte:</i> [55].	52
Figura 19 - Corrente de FAI em gramado. <i>Fonte:</i> [55].	53
Figura 20 - Corrente e tensão de FAI em solo seco. <i>Fonte:</i> [55].	53
Figura 21 - Corrente e tensão de FAI em solo molhado. <i>Fonte:</i> [55].	53
Figura 22 - Modelo 1.	56
Figura 23 - Modelo 1990. <i>Adaptado de:</i> [43].	56
Figura 24 - Modelo 1993. <i>Adaptado de:</i> [64].	57
Figura 25 - Modelo de 1998. <i>Adaptado de:</i> [66].	58
Figura 26 - Modelo 2001. <i>Fonte:</i> [10].	60
Figura 27 - Característica tensão-corrente de FAI. <i>Fonte:</i> [8].	61
Figura 28 - Modelo 2004. <i>Adaptado de:</i> [71].	63
Figura 29 - Modelo 2005. <i>Fonte:</i> [72].	64
Figura 30 - Modelo 2006. <i>Adaptado de:</i> [41].	65
Figura 31 - Modelo 2010. <i>Fonte:</i> [32].	66
Figura 32 - Sinal de corrente do modelo 2010. <i>Fonte:</i> [32].	66

Figura 33 - Sinal de alta frequência durante FAI. <i>Fonte:</i> [12].....	75
Figura 34 - Sistema de detecção de FAI da ABB. <i>Fonte:</i> [9].	78
Figura 35 - Modelo de FAI: Elementos Controlados.....	82
Figura 36 - MODEL control.	83
Figura 37 - Interface MODEL control – Parâmetros 1.....	84
Figura 38 - Interface MODEL control - Parâmetros 2.	84
Figura 39 - Interface MODEL control - Parâmetros 3.	85
Figura 40 - MODEL qdte.....	87
Figura 41 - Detecção de Ciclo.	87
Figura 42 - Detecção de Semiciclo.....	88
Figura 43 - Fluxograma do MODEL qdte.	89
Figura 44 - Bloco MODEL start.	90
Figura 45 - Indicação de Rompimento do Cabo.	91
Figura 46 - Indicação de Toque no Solo.	91
Figura 47 - Fluxograma do MODEL start.	92
Figura 48 - MODEL tarç.	93
Figura 49 - Funcionamento do MODEL tarç.	94
Figura 50 - Fluxograma do MODEL tarç.....	94
Figura 51 - MODEL switch.	95
Figura 52 - Rompimento do Condutor e Abertura de CH1.....	96
Figura 53 - Toque do Condutor no Solo e Fechamento de CH2.....	96
Figura 54 - Funcionamento do MODEL switch.....	97
Figura 55 - Fluxograma do MODEL switch.....	98
Figura 56 - MODEL r1.	99
Figura 57 - Exemplo de Comportamento de $r1$	100
Figura 58 - Fluxograma do MODEL r1.....	101
Figura 59 - MODEL r2.	103
Figura 60 - Exemplo de Cálculo de zonas de $r2$	104
Figura 61 - Comportamento de $r2$	105
Figura 62 - Fluxograma do MODEL r2.....	107
Figura 63 - Exemplo de Cálculo de Zonas de $r3$	109
Figura 64 - Comportamento de $r3$	110
Figura 65 - Fluxograma do MODEL r3.....	112
Figura 66 - Fluxograma de Relação das Variáveis do Modelo de Falta (parte1).	113
Figura 67 - Fluxograma de Relação das Variáveis do Modelo de Falta (parte2).	114

Figura 68 - Modelo em Sistema Não Real.	115
Figura 69 - Caso 1.	117
Figura 70 - Caso 1 - Aproximação.	117
Figura 71 - Corrente de FAI. <i>Fonte:</i> [55].	118
Figura 72 - Caso 2.	118
Figura 73 - Corrente de falta em cascalho fino. <i>Fonte:</i> [10].	119
Figura 74 - Caso 3.	120
Figura 75 - Sinal de Corrente de FAI real . <i>Adaptado de:</i> [70]	120
Figura 76 - Caso 4.	122
Figura 77 - Corrente instantânea de uma FAI. <i>Fonte:</i> [44].	122
Figura 78 - Janela de 1 e 12 Ciclos Percorrendo o Sinal.	126
Figura 79 - Fluxograma de Extração de Características.	127
Figura 80 - Indicação de Perda de Carga.	128
Figura 81 - Progressão do Valor RMS.	129
Figura 82 - Assimetria: Detecção e Variação.	130
Figura 83 - <i>Flags</i> da Presença de Harmônicos.	130
Figura 84 - <i>Flags</i> da Variação de Harmônicos.	131
Figura 85 - <i>Flag</i> de Inter-Harmônicos.	132
Figura 86 - Fluxograma de Indicadores e <i>Flags</i>	133
Figura 87 - Fluxograma do Detector de Rompimento de Condutor.	135
Figura 88 - Fluxograma da Detecção de Arco.	138
Figura 89 - Fluxograma do Detector de Harmônicos.	140
Figura 90 - Fluxograma do Detector de Variação de Harmônicos.	142
Figura 91 - Fluxograma da Detecção de Falta.	143
Figura 92 - Diagrama Unifilar IEEE 34 Barras. <i>Fonte:</i> [92].	145
Figura 93 - Tempo de Detecção Solo Molhado.	148
Figura 94 - Tempo de Detecção Solo Seco.	149
Figura 95 - Tempo de Detecção Solo Arenoso.	149
Figura 96 - Detalhe do Tempo de Detecção Solo Arenoso.	150

Lista de tabelas

Tabela 1 - Valores de corrente em diferentes tipos de solo em um sistema de distribuição de 13,8 kV. <i>Adaptado de:</i> [44]	35
Tabela 2 - Correntes de falta em diversos tipos de solo. <i>Adaptado de:</i> [45]	35
Tabela 3 - Correntes típicas de FAI. <i>Adaptado de:</i> [12]	36
Tabela 4 - Espectro da corrente de falta. <i>Adaptado de:</i> [10]	43
Tabela 5 - Conteúdo espectral dos harmônicos pares e ímpares em solo úmido (local 1) e seco (local 2), como porcentagem do componente fundamental, durante a falta com arco. <i>Adaptado de:</i> [20]	43
Tabela 6 - Resumo das Características das FAI.	54
Tabela 7 - Resumo das Características Representadas de Modo Satisfatório por Cada Modelos de FAI.	68
Tabela 8 - Comparação do aumento relativo dos harmônicos pares e ímpares. <i>Adaptado de:</i> [20]	72
Tabela 9 - Tempo de Intermittência de Arcos em Diferentes Tipos de Solo [1].	165

Sumário

1	Introdução	27
1.1	Objetivos.....	28
1.2	Organização do Documento	29
2	Caracterização das Faltas de Alta Impedância.....	31
2.1	A Falta de Alta Impedância: Causa, Progressão e Dependência do Meio... 31	
2.1.1	Rompimento do Condutor e Acomodação	31
2.1.2	Corrente Drenada e Tipos de Solo	34
2.1.3	O Arco Elétrico	36
2.2	Análise do Espectro de Baixa Frequência	42
2.2.1	Relação Entre a Umidade do Solo e a Duração do Arco	45
2.2.2	Relação Entre o Tempo de Reignição e o Tipo de Solo	45
2.2.3	Relação Entre o Tipo de Solo e as Frequências Inter-Harmônicas do Espectro de Baixa Frequência.....	46
2.2.4	Espectro de Baixa Frequência na Presença de Fenômenos e Operações Comuns ao Sistema	46
2.3	Espectro de Alta Frequência.....	48
2.4	Ensaio em Campo e Medições Laboratoriais.....	49
3	Modelos Elétricos para Faltas de Alta Impedância.....	55
3.1.1	Modelo 1	55
3.1.2	Modelo 2 [43] (Modelo de Emanuel).....	56
3.1.3	Modelo 3 [64]	57
3.1.4	Modelo 4 [65]	57
3.1.5	Modelo 5 [66]	58
3.1.6	Modelo 6 [10]	59
3.1.7	Modelo 7 [71]	62
3.1.8	Modelo 8 [72]	63
3.1.9	Modelo 9 [41]	65
3.1.10	Modelo 10 [32]	65
3.2	Considerações Finais Sobre o Capítulo	67
4	Deteção das Faltas de Alta Impedância	69
4.1	Algoritmos e Métodos para Deteção das Faltas de Alta Impedância ...	69

4.2	Algoritmos Utilizados por Relés Comerciais	77
4.2.1	Relé REF550 – ABB	77
4.2.2	Relé SEL-451 – Schweitzer	78
4.2.3	Relé F60 – General Electric (GE).....	78
4.3	Considerações Finais Sobre o Capítulo.....	80
5	Modelo Computacional de Falta de Alta Impedância Proposto.....	81
5.1	O Modelo Proposto	81
5.1.1	MODEL control	82
5.1.2	MODEL qdte	86
5.1.3	MODEL start.....	89
5.1.4	MODEL tarce	92
5.1.5	MODEL switch.....	95
5.1.6	MODEL r1	99
5.1.7	MODEL r2.....	102
5.1.8	MODEL r3.....	108
5.1.9	Relação entre as Variáveis dos Blocos	113
5.2	Resultados do Modelo: Reprodução de Características de Faltas da Alta Impedância.....	115
5.2.1	Caso 1: FAI sem <i>Buildup</i>	116
5.2.2	Caso 2: FAI com <i>Buildup</i>	118
5.2.3	Caso 3: FAI com <i>Buildup</i> e Assimetria	119
5.2.4	Caso 4: FAI com <i>Buildup</i> , Assimetria e Modulações	121
5.3	Considerações Finais Sobre o Capítulo.....	122
6	Algoritmo para Detecção de Falta de Alta Impedância.....	125
6.1	Índices de Detecção e Extração de Características	125
6.2	Lógica de Detecção de Falta de Alta Impedância.....	134
6.2.1	Detector de Rompimento.....	134
6.2.2	Detector de <i>Buildup</i>	136
6.2.3	Detector de Arco	136
6.2.4	Detector de Harmônicos de Interesse	139
6.2.5	Detector de Variação de Harmônicos de Interesse	141
6.2.6	Detector de Falta.....	143
7	Simulações de Falta e Parametrização dos Indicadores e Limites do Algoritmo	145

7.1	Sistema de Distribuição e Parametrização do Modelo	145
7.2	Resultados do Algoritmo de Detecção.....	148
8	Conclusões.....	151
8.1	Sugestões Para Trabalhos Futuros.....	153
9	Referências.....	155
	Apêndice – Tempo de Intermittência dos Arcos.....	165

1 Introdução

Quando ocorre o rompimento e consequente queda de um condutor, pode ser que, em seu trajeto ou ponto de repouso, este cabo venha a tocar edificações e até mesmo pessoas. Se não houver o desligamento do trecho do sistema onde ocorreu a falha, o risco de toque em condutor vivo e a possibilidade de ignição de arco elétrico [1] oferecem risco à vida e ao patrimônio.

Este cenário pode ocorrer quando um condutor, em geral da rede primária, entra em contato com uma superfície quase isolante [2], [3]. Devido à elevada resistência, não há incremento significativo na amplitude da corrente e, portanto, esta condição de defeito não pode ser identificada por dispositivos de proteção convencionais, tais como relés de sobrecorrente e fusíveis [2], [4], [5]. Esta ocorrência é conhecida como Falta de Alta Impedância (FAI).

O contato com a superfície de alta impedância pode ser direto, quando o condutor toca o solo, ou indireto, quando o caminho da corrente de falta ao solo se dá por meio de outro objeto, a exemplo de uma árvore [4]. Estima-se que de um terço à metade das faltas causadas por rompimento de condutores sejam faltas de alta impedância [6] e que estes eventos causem a média de 54 mortes ao ano no Brasil [7]. Ainda, a maioria dos incêndios de origem elétrica é causada em decorrência dos arcos elétricos [8]. Menos grave, devido a sua não linearidade, as FAI introduzem harmônicos na rede, afetando a qualidade da energia entregue aos consumidores [4]. Posto isso, as concessionárias de energia elétrica têm maior preocupação com faltas de alta impedância decorrentes de rompimentos de cabo, ou seja, com toque direto [8].

A detecção das faltas de alta impedância continua sendo, ainda hoje, um dos problemas mais desafiadores no ramo da engenharia elétrica, devido à dificuldade de detecção e distinção confiável de outros fenômenos [3], [4], [9]. Os principais motivos desta dificuldade são os reduzidos valores de amplitude de corrente e seu comportamento errático. É reportado que os relés para detecção de FAI detectam apenas 50 a 60% destes eventos [10], [11] e que estas faltas podem permanecer por dias [12]. Em 200 testes, realizados em tensão de 13,8 kV, sob diversas condições de operação, menos de 10% das faltas foram extintas por relés de sobrecorrente de fase e terra [12]. Em razão dos motivos apresentados fica claro que é de grande relevância estudar este fenômeno, a fim de

proteger pessoas e patrimônios e que ainda existe espaço e necessidade de pesquisas na área.

Atualmente, o estudo das características e detecção de faltas de alta impedância se baseia tanto em sinais reais, medidos em experimentos de campo ou laboratório, quanto em modelos computacionais, sejam eles baseados em dados reais ou em características presentes na literatura. Os métodos de detecção que utilizam ferramentas matemáticas, foco deste estudo, tem se concentrado na extração das características da corrente da tensão geradas pelas FAI.

1.1 Objetivos

Os objetivos deste trabalho são:

- Desenvolver um modelo que represente as principais características das faltas de alta impedância.
- Propor um algoritmo de detecção da falta gerada pelo modelo, baseado na identificação das características dos sinais descritos na literatura.

De modo mais detalhado, o trabalho proposto consiste em duas etapas: a primeira destina-se à obtenção de um modelo elétrico que reproduza as principais características das FAI com presença de arco elétrico, decorrentes do contato de condutores da rede primária com o solo, em sistemas de distribuição em média tensão. Este modelo deve ser abrangente em relação aos diversos parâmetros que este defeito produz, tais como não-linearidade entre tensão e corrente, assimetria entre os semiciclos de corrente, fenômenos de *buildup e shoulder* e intermitência, como será explicado ao longo do documento. Para isso, será necessário compor uma representação que permita a reprodução do fenômeno, não somente elétrico, como também mecânico, incorporando o comportamento que inicia com o rompimento do cabo, procede à queda e início da falta. Ainda, será estudado um meio pelo qual seja incorporada a aleatoriedade dos sinais de tensão e corrente resultante do arco elétrico. O propósito é que este modelo sirva de base para simulações das faltas de alta impedância em redes de distribuição, já que testes laboratoriais e em campo são custosos e oferecem risco aos envolvidos.

A segunda etapa do trabalho consiste em, utilizando o modelo proposto, simular FAI em sistemas de distribuição, para que então, por meio da análise dos resultados das oscilografias, seja possível estabelecer meios e métodos para extrair as características dos sinais de tensão e corrente obtidos, com propósito de identificar a ocorrência deste defeito. Será dada preferência a métodos que utilizem ferramentas matemáticas, como transformadas. O algoritmo proposto deve identificar a falta observando as características das faltas de alta impedância encontradas na literatura.

1.2 Organização do Documento

Este documento está organizado em nove capítulos. A partir deste, o segundo capítulo tratará das faltas de alta impedância, desde a causa de sua ocorrência, progressão e características no domínio do tempo e da frequência, além da dependência do meio. As características estudadas no segundo capítulo servirão de base para a elaboração do modelo.

No terceiro capítulo serão apresentados os modelos elétricos, encontrados na literatura técnica, pelos quais se tenta reproduzir as características das FAI em sistemas simulados. As ferramentas e métodos de detecção de FAI serão apresentados no quarto capítulo, que tratará, ainda que de modo breve, das tecnologias embarcadas nos relés modernos.

No quinto capítulo o modelo proposto será explicado, seguido do algoritmo de detecção, apresentado no capítulo de número seis.

O sétimo capítulo traz as simulações com modelo inserido em um sistema de distribuição e discute os resultados da detecção. As conclusões e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no oitavo capítulo. Por fim, seguem as referências bibliográficas.

2 Caracterização das Faltas de Alta Impedância

Neste capítulo a falta de alta impedância será estudada seguindo sua progressão temporal. Serão analisados os motivos de sua ocorrência, iniciando com o rompimento do condutor da rede primária, o período de queda e seus efeitos.

Após a queda, será estudada a corrente drenada pela falta, a qual é dependente do tipo de solo. Serão estudados os valores típicos para cada um deles. Ainda, neste tipo de falha, ocorre a formação do arco elétrico. O motivo de sua formação e suas características também serão apresentados.

Valores típicos de amplitude dos componentes do espectro de uma FAI e tempo de ignição e extinção do arco serão analisados, assim como sua relação com diferentes tipos de solo e condições do meio. Oscilografias de ensaios reais, apresentadas ao final do capítulo, têm o propósito de tornar familiar a assinatura de uma FAI.

2.1 A Falta de Alta Impedância: Causa, Progressão e Dependência do Meio

2.1.1 Rompimento do Condutor e Acomodação

Como já explicado, as faltas de alta impedância ocorrem quando um condutor entra em contato com uma superfície quase isolante [2], [3]. Este contato pode ser direto, quando o condutor toca o solo, ou indireto, quando o caminho da corrente de falta ao solo se dá por meio de algum outro objeto, a exemplo de uma árvore [4]. Este estudo se concentrará no primeiro caso, e, posteriormente, em trabalhos futuros, poderá ser estendido para o toque indireto, já que os dois tipos de defeito compartilham características semelhantes, tais como baixa corrente e presença de arco.

O toque direto tem início com o rompimento do cabo, que acontece, principalmente, por fadiga mecânica, causada pela exposição às intempéries, tais como chuva e sol, que causam dilatações e contrações no material, o qual, devido ao seu peso e à tração a ele

aplicada, fica predisposto à ruptura. O cabo também pode ser danificado e fragilizado como consequência de toque entre fases, causado por ventos fortes. A Figura 1 mostra um cabo danificado em consequência a um destes eventos.

Figura 1 - Cabo danificado após choque entre fases. *Fonte:* [14].

Desde o momento da ruptura, o fenômeno pode começar a ser investigado, já que a fase danificada para de alimentar as cargas à jusante do ponto de falta e o fluxo de potência é alterado. Deste modo, o nível de desbalanço de tensão é modificado, permitindo diferenciar condições normais de operação do momento de ruptura [15].

Após o rompimento, tem início a queda do condutor ao solo, que dura menos que 2 segundos. Admitindo uma altura da rede primária ao solo de 8 m [8], por exemplo, o tempo de queda é de 1,28 s, calculado pela equação (1) (equação de queda livre).

$$t_{queda} = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{16}{9,8}} \approx 1,28 \text{ s} \quad (1)$$

Sendo h a altura do cabo ao solo no ponto de ruptura, em metros, e g a aceleração da gravidade, em m/s^2 .

Como referência de altura dos condutores da rede primária em relação ao solo, pode ser utilizada a norma GED-2859 - volume 4.1.

O tempo de queda pode ser utilizado na detecção, separando temporalmente dois fenômenos diferentes (interrupção da corrente e início da falta) por um período de tempo conhecido. Passado o tempo de queda, é possível que o condutor toque o solo do lado da fonte, foco deste estudo, da carga ou de ambos, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 - Rompimento de condutor. *Fonte:* [8].

No instante do toque ao solo, o cabo possui velocidade e, portanto, até que seja encontrado um ponto de equilíbrio estático, existe um período de acomodação, de duração indefinida, no qual o cabo pode rebater no solo ou apenas se acomodar, aumentando a superfície de contato, e, portanto, a corrente, até que cesse seu movimento. A Figura 3, apresentada em [8], ilustra este evento por meio de um experimento real de ruptura de um cabo da rede primária.

Figura 3 - Forma de onda da corrente de cabo rebatendo no solo. *Fonte:* [8].

Na Figura 3, observa-se que de 0 a 0,5 s não há corrente de falta, pois o cabo está em queda. Cabe comentar que, por ter sido conduzido de modo experimental, o tempo de queda (0,5 s) é menor que o esperado, já que o cabo não foi lançado de um poste com altura padrão. Vê-se que o toque do cabo no solo ocorre em torno de 0,5 s. Deste ponto até 0,65 s, aproximadamente, a corrente aumenta devido ao cabo aumentar sua superfície de contato com o solo. De 0,65 s até pouco mais de 1 s a corrente diminui. Neste espaço de tempo o

cabo rebateu no solo, reduzindo a superfície de contato e diminuindo a corrente de falta. Após 1,5 s o cabo volta a cair e se acomoda.

2.1.2 Corrente Drenada e Tipos de Solo

Após o momento em que o cabo se acomoda é de interesse analisar o comportamento da corrente de falta. Sua amplitude é função da resistência de cada tipo de solo submetida à tensão da fase rompida. Alguns trabalhos tratam sobre a resistência destes solos, porém, na maioria destes estudos, uma FAI é caracterizada não diretamente por este parâmetro, mas por meio da corrente drenada pela falha. Nesta seção serão revisados alguns trabalhos com a intenção de definir uma faixa e a ordem de grandeza para a corrente de falta a ser adotada como resposta do modelo que será desenvolvido para uso em simulações.

Os sistemas de distribuição em média tensão são definidos pelo Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica do Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) [17] como tendo tensão entre 1 kV e 69 kV. Na maior parte dos casos, as faltas de alta impedância com presença de arco são estudadas em sistemas com tensões de linha nas faixas de:

- 11,0 a 12,5 kV: [3], [6], [18]–[23].
- 13,0 a 15,0 kV: [8], [9], [12], [24]–[29].
- 20,0 a 25,0 kV: [5], [10], [30]–[41].

O estudo da literatura aponta que a corrente de falta de uma FAI está compreendida em uma faixa que vai de 0 A até 75 A:

- 10 a 50 A [4].
- 0 a 50 A [42].
- 0 a 75 A [2].

A exemplo, em [43] foi analisada a corrente em solo arenoso em um experimento em campo. Dados de corrente de falta foram coletados das fases de um sistema de distribuição com tensão de linha de 13,8 kV, no ponto em que a falta foi aplicada. O valor eficaz máximo da corrente relativo ao componente fundamental foi de 15 A. Em um sistema de 22,9 kV

[10], foram conduzidos experimentos de FAI em dois tipos de solos rochosos. Os dados foram medidos no ponto de falta. O máximo valor eficaz da corrente, com base nos gráficos apresentados, foi de, aproximadamente, 60 A.

Em solo de terra gramada um experimento de FAI, em um sistema de 7967 V (tensão de fase) registrou-se corrente eficaz média de 57 A [8]. Em outro experimento [44], conduzido num sistema de 13,8 kV, mediu-se a corrente de falta em diversos tipos de solo. A máxima corrente para cada um deles está listada na Tabela 1.

TABELA 1 - VALORES DE CORRENTE EM DIFERENTES TIPOS DE SOLO EM UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE 13,8 kV. ADAPTADO DE: [44]

Tipo de Solo	Máxima Corrente Eficaz (A)
cimento	25,28
asfalto	12,54
cascalho	10,51
areia seca	4,67
areia molhada	7,83
argila seca	16,78
argila molhada	25,24
grama seca	26,13
grama molhada	34,07

Em [45], trinta e duas FAI foram provocadas em um sistema de distribuição de 20 kV a 30 km da subestação, em diversos tipos de solo e condições de umidade. A Tabela 2 mostra o tipo de solo, a condição de umidade e o valor eficaz da maior corrente medida no ponto da falta.

TABELA 2 - CORRENTES DE FALTA EM DIVERSOS TIPOS DE SOLO. ADAPTADO DE: [45]

Solo	Condição	Corrente Eficaz
areia	molhada	25,64 A
	seca	14,39 A
asfalto	molhado	36,64 mA
	seco	95,94 mA
gramado	molhado	57,18 A
cascalho grosso	molhado	31,24 A
	seco	114,5 mA
cascalho fino	seco	28,89 A
concreto	molhado	62,92 A
	seco	32,08 A
terra	molhada	46,73 A
	seca	10,52 A
árvore(conífera)	molhada	38,13 A
	seca	22,56 A

Por fim, quando se trata de corrente de falta de alta impedância, uma das referências mais citadas [12] estabeleceu faixas típicas para a corrente de falta em diferentes tipos de solo, tomando como base 200 experimentos num sistema de 13,8 kV, como mostra a Tabela 3.

TABELA 3 - CORRENTES TÍPICAS DE FAI. ADAPTADO DE: [12]

Solo	Corrente (A)
asfalto seco	0
areia seca	0
concreto (não reforçado)	0
areia molhada	15
relva seca	20
areia seca	25
relva molhada	40
areia molhada	50
concreto (reforçado)	75

Dos valores apresentados pela literatura estudada e aqui citada, é possível estabelecer, em sistemas de distribuição de 11 kV até 25 kV, uma faixa de corrente eficaz para enquadrar as faltas de alta impedância. Este limite vai de 0 A a 75 A. De modo mais específico, tomando como base os trabalhos baseados em sistemas de 13,8 kV [8], [43], [44] muito utilizados no Brasil, a corrente mínima encontrada foi de 4,76 A e a máxima de 57 A.

2.1.3 O Arco Elétrico

Faltas de alta impedância se comportam, em alguns aspectos, de modo similar a operações de chaveamento comuns em redes de distribuição [4], por isso, características únicas precisam ser encontradas para que seja possível discernir os eventos. A particularidade mais distinta das FAI é o arco elétrico. Este fenômeno faz com que o defeito tenha características de natureza aleatória. O caminho ionizado pelo arco, pelo qual ocorre a condução da corrente de falta, se modifica de acordo com variáveis como temperatura ambiente, umidade, evaporação e reações químicas entre as superfícies de contato. A presença do arco elétrico causa, como será mostrado ao longo do texto, assimetria entre semiciclos da corrente, relação não linear entre tensão e corrente e fenômenos de *buildup* e *shoulder* [24].

O arco é uma descarga elétrica entre dois eletrodos, através de gás ou vapor. Ele ocorre como resultado do mau contato [4] entre o condutor e uma superfície de baixa condutância [6]. No instante em que o cabo toca o solo, o campo elétrico ao redor da superfície de contato é modificado, causando a aceleração de elétrons no meio. Estes elétrons ionizam moléculas ao seu redor que, por sua vez, ionizam outras moléculas. Este fenômeno ocorre numa fração de segundos, diminuindo a impedância do caminho ionizado

e permitindo a formação do arco elétrico e passagem de corrente, num evento conhecido como avalanche. Este processo causa o surgimento de harmônicos ímpares no sistema durante a falta [43].

As três regiões do arco: catodo, anodo e a coluna positiva [46] são mostradas na Figura 4. As linhas tracejadas representam a distribuição do campo elétrico. A curva abaixo das linhas de campo traça a tensão do arco. Como indicado na figura, a queda de tensão na região do anodo é menor que a do catodo e a coluna positiva ou plasma tem gradiente de tensão uniforme [47].

Figura 4 - Regiões do arco. *Adaptado de:* [46].

Os arcos atingem temperatura de 5000 °C a 10000 °C [48], temperatura suficiente para derreter e colocar em ebulição condutores de alumínio e cobre. Eles podem ser iniciados de três modos [46]:

- Descarga causada por ionização do meio, devido à grande diferença de potencial elétrico entre anodo e catodo.
- Contato físico.
- Transição do estado de luminescência para arco.

Sistemas de baixa tensão são incapazes de ionizar o ar. Neste caso, arcos podem ser iniciados pela interrupção da passagem da corrente, seja de um curto-circuito previamente estabelecido ou da interrupção da corrente de carga, como é o caso de chaves, tais como chave faca ou disjuntores ou de um cabo fase solto, tocando esporadicamente uma

superfície aterrada [48]. Sistemas de média tensão, foco deste estudo, têm a capacidade de iniciar um arco dos três modos apresentados.

O estado de luminescência é caracterizado por um potencial relativamente alto e correntes pequenas (menores que 1 A), enquanto o arco é caracterizado por tensões pequenas e correntes maiores que 10 A [49]. O estado de luminescência passa a ser arco quando uma quantidade grande de elétrons é liberada pelo catodo. Certas condições, como impurezas entre as superfícies e ranhuras, aumentam a probabilidade da formação do arco [50]. O presente trabalho não tem a intenção de estudar o arco sob a ótica de equações termodinâmicas e outras necessárias para um exato equacionamento do fenômeno, ao invés disso, os parâmetros necessários para a elaboração do modelo de FAI serão baseados em valores encontrados na literatura de ensaios em alimentadores reais e em laboratório. Para aprofundamento, os trabalhos [51]–[54] explicam com mais detalhes a física do arco elétrico.

O estudo prático do comportamento do arco elétrico, com foco nas faltas de alta impedância em sistemas de distribuição, tem como referência na literatura o trabalho [43], no qual, além do estudo das características do arco, foi proposto o modelo que serviu e ainda serve de base para outros trabalhos se inspirarem em busca de melhorar as simulações das faltas de alta impedância. Ele apresenta os mecanismos de ignição, a influência do meio, parte do conteúdo espectral gerado, forma de onda, entre outras características das FAI. O estudo foi conduzido em solo arenoso, porém, como será visto, o conteúdo espectral, ou de modo informal, a assinatura da forma de onda, é muito semelhante em tipos de solo diferentes, portanto, o estudo do mecanismo do arco em solo arenoso, estende o entendimento para outros tipos de solo.

Assim sendo, no caso da areia, a sílica age como um catodo, emitindo elétrons quando a tensão do arco é positiva. Isto causa um desbalanço entre os semiciclos de tensão e corrente. No semiciclo positivo, a tensão possui menor amplitude, enquanto a corrente apresenta amplitude maior em relação ao semiciclo negativo. Esta assimetria é a única responsável pelo surgimento do componente de segundo harmônico no espectro, e tem pouca influência na geração do terceiro harmônico [43]. Em outros solos, o mesmo ocorre devido à umidade, que modifica a tensão do arco a cada semiciclo [55]. Esta assimetria pode ser vista na Figura 5. A diferença é mais clara na corrente, já que a medida foi tomada de um experimento de FAI na saída de um transformador.

Figura 5 - Corrente e tensão de FAI em solo seco. Fonte: [55].

Como foi dito, o segundo harmônico se torna mais evidente quanto maior a diferença de tensão de ignição do arco ΔV entre os semiciclos. Esta diferença não afeta significativamente o componente de terceira ordem. Este último é afetado pela amplitude da tensão de avalanche [43].

Ainda sobre o arco elétrico, antes de se consolidar, ou seja, da estabilização de um caminho ionizado que permita o estabelecimento de corrente, pode haver um fenômeno chamado de centelhamento, que é o início do processo de formação do arco, mas que logo é cessado, sem que decorra a avalanche. Este efeito, que pode ocorrer repetidas vezes até que o arco se forme, é responsável pela geração de componentes harmônicos de alta frequência [8]. Geralmente inicia com duração curta (0,1 ms ou menos), evoluindo para arcos mais longos [56].

Além da assimetria e dos harmônicos de alta frequência, outra característica encontrada nas FAI é o aparecimento de uma envoltória crescente na forma de onda de corrente. Este fenômeno é causado pelo aumento da amplitude da corrente até seu valor máximo [57]. O nome que se dá a este fenômeno é *buildup*, o qual está exemplificado na Figura 6.

Figura 6 - Corrente de falta em cascalho fino. *Fonte:* [10].

Frequentemente, um evento denominado *shoulder* [24], ou patamar de tensão, acompanha o *buildup*. Os patamares são períodos nos quais o crescimento da corrente é interrompido e a amplitude da corrente é mantida constante, até que comece a crescer novamente, como pode ser visto por patamares em vermelho, na Figura 7.

Figura 7 - Corrente de falta em cascalho grosso. *Fonte:* [10].

Ainda, há na corrente de falta a presença de componentes inter-harmônicos. Eles podem ser explicados como o resultado do arco, que rearranja as características dos caminhos de falta ao seu redor [55]. Devido à aleatoriedade deste processo, a variação da resistência de contato do arco causa oscilação da amplitude de corrente a cada ciclo [55]. Essa mudança pode ser percebida na forma de modulação e pontos de descontinuidade. A Figura 8 e a Figura 9 mostram oscilografias de faltas reais exibindo este comportamento.

Figura 8 - Comportamento aleatório da amplitude da corrente. *Fonte:* [55].

Figura 9 - Corrente instantânea de uma FAI. *Fonte:* [44].

A modulação, o *buildup* e assimetria cessam quando o arco se extingue. Isso pode ocorrer a qualquer momento. Em solo arenoso, quando o arco se forma, o calor gerado pode ocasionar a fusão da sílica presente na areia, dando origem a uma formação vítrea, denominada fulgurito, mostrada na Figura 10. Estas formações possuem resistência linear, da ordem de 2 a 100 k Ω /m [43], o suficiente para impedir a passagem da corrente, contribuindo para a intermitência da falta.

Figura 10 - Fulgurito. Resultado da fusão da sílica em solo arenoso. *Fonte:* [58].

O calor gerado pelo arco causa a evaporação da água presente no solo. Com a redução da umidade do solo ocorre a elevação de sua resistência, levando, em alguns casos, o arco a se extinguir. Em [59] é mostrado que a resistividade do solo diminui com o aumento da salinidade, umidade e temperatura. Em [43], foi encontrado que solos mais densos estão relacionados a arcos de menor tensão e solos mais secos estão relacionados a arcos de maior tensão. Após sua extinção, a reignição do arco pode ocorrer por dois meios: pela difusão da água no solo, permitindo novo efeito avalanche, ou por outro ponto de contato do condutor com a superfície [7].

Em suma, as faltas de alta impedância são resultado de interações complexas, que envolvem [55]:

- Não linearidade do arco.
- Interface entre o condutor e o solo.
- Movimentação do condutor no solo.
- Capacidade térmica do condutor, do solo e do ar.
- Umidade, salinidade e temperatura do solo.
- Produção de fumaça.
- Movimento das partículas no solo.
- Tipo de solo.
- Reações químicas no meio.

Estas condições fazem com que as faltas de alta impedância apresentem em seu espectro de frequências: componentes harmônicos pares e ímpares, frequências intercaladas (inter-harmônicos) e sinais de alta frequência. Ainda, possuem comportamento aleatório, com ignição e extinção erráticas.

2.2 Análise do Espectro de Baixa Frequência

É de interesse estudar frequências que compõem a corrente de falta para saber se existe a possibilidade de utilizar alguma ou um grupo delas para caracterizar o fenômeno, com o intuito de elaborar algoritmos de detecção baseados nestas características. O

Espectro de Baixa Frequência (EBF) compreende a faixa de frequências abaixo de 2 kHz [12], [60]. As FAI podem gerar uma vasta gama de frequências ao longo desta banda. Nestes eventos, as frequências ímpares dominam o tempo todo e as frequências pares podem persistir [20]. Para traçar o perfil harmônico do EBF serão apresentados estudos, nos quais, por meio de dados coletados de FAI em sistemas de distribuição reais ou em ensaios laboratoriais, se possa analisar o espectro destas frequências em solos distintos e com variadas durações de arcos, com a finalidade de estabelecer relações entre estes cenários e identificar os parâmetros para a detecção do fenômeno.

Em [10], num alimentador de 22,9 kV, foram conduzidos ensaios de FAI em cascalho, então foi extraído o espectro de baixa frequência em regime (após cessar *buildup*). Os valores dos harmônicos estão na Tabela 4.

Tabela 4 - Espectro da corrente de falta. *Adaptado de:* [10]

Ordem dos Harmônicos	1º	2º	3º	4º	5º
Valor (A)	75,9	0,31	8,95	0,41	2,90

Em [20], num sistema de 12,5 kV, 80 medidas de FAI foram tomadas em solos úmidos (local 1) e secos (local 2). Na Tabela 5 se tem o conteúdo espectral, separado em harmônicos pares e ímpares, tanto no local 1 quanto no local 2. Os valores foram calculados como porcentagem do componente fundamental.

Tabela 5 - Conteúdo espectral dos harmônicos pares e ímpares em solo úmido (local 1) e seco (local 2), como porcentagem do componente fundamental, durante a fada com arco. *Adaptado de:* [20]

Harmônicos Ímpares			Harmônicos Pares		
Ordem	Local 1 (úmido)	Local 2 (seco)	Ordem	Local 1 (úmido)	Local 2 (seco)
	(% do componente fundamental)			(% do componente fundamental)	
1	100	100	2	0,14	0,85
3	0,83	2,90	4	0,16	0,87
5	0,35	4,50	6	0,24	0,75
7	1,00	2,30	8	0,06	0,51
9	0,50	1,10	10	0,10	0,31
11	0,38	0,73	12	0,11	0,37
13	0,19	0,37	14	0,07	0,34
15	0,10	0,31	16	0,11	0,26
17	0,09	0,35	18	0,07	0,34
19	0,09	0,25	20	0,06	0,24

Como esperado, os harmônicos ímpares são predominantes nos dois tipos de solo. Em solo seco, devido à tensão de ignição do arco ser maior e, portanto, existir maior distorção da corrente, há maior presença de frequências não fundamentais, em comparação com o solo úmido.

Em outro ensaio conduzido em laboratório [43], foi utilizado um transformador monofásico, com tensão de 7,9 kV para aplicar faltas em solo arenoso. Do estudo de diversas medidas, os pesquisadores observaram propriedades das FAI, com o intuito de estabelecer quais seriam as frequências harmônicas mais confiáveis para caracterizar este tipo de fenômeno e quais os atributos de tensão e corrente inerentes a ela. As conclusões foram:

- Correntes com frequência acima de 180 Hz apresentam grande variação de amplitude com o decorrer da falta.
- Correntes de falta maiores do que 1 A apresentam arcos estáveis, com valor eficaz quase constante por longos períodos de tempo.
- Para correntes de falta maiores que 10 A o terceiro harmônico de corrente apresenta valores entre 5% e 15% do componente fundamental.
- Para a mesma faixa de corrente (maior que 10 A), o componente de segunda ordem ficou entre 3,7% e 6,7% do fundamental.

O espectro de baixa frequência também foi estudado em [1]. No trabalho foram analisados componentes harmônicos e inter-harmônicos em FAI e o seu comportamento em relação à duração do arco, taxa de repetição de intermitência, e amplitude. Em relação à composição espectral, em resumo, é possível dizer que, tanto em solos úmidos quanto secos, as frequências inter-harmônicas apresentam elevado aumento relativo sob condições de falta. Seu espectro é imprevisível, com aleatoriedade mais acentuada em arcos de curta duração. As frequências harmônicas também apresentam elevação substancial, mas mostram variação mais consistente, menos relacionadas à duração do arco [1].

Em outro trabalho [61], experimentos em campo mediram a variação de energia dos componentes pares, ímpares e dos inter-harmônicos associados a condições de FAI. Foi percebido que os componentes inter-harmônicos da corrente são sensíveis a arcos de curta duração, já que, no momento em que eles ocorrem no tempo, há aumento da energia das frequências em questão, como previamente observado em [1]. O mesmo ocorre para os componentes harmônicos de ordem par. Em arcos de curta duração não foram registradas significativas alterações de energia nos componentes de ordem ímpar. Na análise de arcos de longa duração, tanto os harmônicos de ordem par, quanto ímpar, apresentaram significativo aumento.

Em [44], em ensaios em campo num alimentador de 13,8 kV, foram aplicadas faltas de alta impedância em solos diversos: areia, cimento, asfalto, grama, entre outros, em condições seca e molhada. O conteúdo inter-harmônico de frequências próximas à fundamental foi analisado. Concluiu-se que os componentes intercalados entre 40 e 80 Hz são bons indicadores da ocorrência de FAI.

2.2.1 Relação Entre a Umidade do Solo e a Duração do Arco

Como já abordado, o tempo em que o arco se sustenta tem relação com a umidade do solo em que a FAI ocorre. Em [1] esta relação foi estudada em solos não arenosos e arenosos. Foi encontrado que em solos com alta umidade, é predominante a presença de arcos de curta duração (1 a 3 ciclos). Em solos secos, os arcos possuem duração média (5 a 20 ciclos). Em solos arenosos, os arcos apresentam longa duração, que vai de 10 a mais de 160 ciclos. Em suma, solos mais secos apresentam arco de duração mais longa.

2.2.2 Relação Entre o Tempo de Reignição e o Tipo de Solo

Ainda tratando do arco elétrico e seu comportamento temporal, além do período de existência do arco, outra característica que pode ser estudada é o período durante o qual o arco fica extinto, ou, de outro modo, o tempo entre a extinção de um arco e ignição de um novo arco. Esta é mais uma informação que pode ser utilizada para delinear as propriedades das FAI. Vale sempre lembrar que, devido à complexidade do fenômeno, talvez não seja possível estabelecer limites rígidos para os valores de interesse aqui estudados, portanto a revisão bibliográfica feita busca indícios dessas propriedades.

Dos mesmos dados de FAI gravados no estudo do tempo de existência do arco, foi feito um estudo do tempo de extinção [1]. As conclusões foram que a duração entre a extinção de um arco e reignição de outro em solo úmido ocorreu em curtos períodos, em sua maioria, menores que 6 ciclos. Em solos secos, este período ficou entre 4 e 20 ciclos. Em solo arenoso, os valores foram maiores que 20 ciclos.

Em comparação com os períodos de existência do arco, pode-se dizer que solos úmidos apresentam arcos de curta duração com curtos períodos de reignição. Solos secos apresentam arcos de média duração com períodos médios de reignição. Por fim, solos arenosos apresentam arcos de longa duração com períodos longos de reignição.

2.2.3 Relação Entre o Tipo de Solo e as Frequências Inter-Harmônicas do Espectro de Baixa Frequência

O estudo da relação entre o tipo de solo e as frequências inter-harmônicas do espectro de baixa frequência da corrente foi estudado em [1]. As frequências observadas foram: 30 Hz, 90 Hz, 150 Hz e 210 Hz. Notou-se que para todas as frequências, o maior aumento relativo em amplitude, do período pré-falta para durante a falta foi observado em solos úmidos, seguido por solos secos e então solos arenosos.

Há de se notar relação deste resultado com as análises feitas para a duração do arco e umidade do solo do seguinte modo: em solos úmidos, a duração do arco é menor. Ainda, como foi estudado, os componentes inter-harmônicos são sensíveis a arcos de curta duração, portanto, em solos úmidos, por apresentarem arcos de curta duração no momento de uma FAI, o aumento relativo desses componentes é significativo. O oposto acontece para solos secos e arenosos, nos quais a duração dos arcos é maior, e, portanto, como foi discorrido, os componentes inter-harmônicos têm menor participação no espectro.

2.2.4 Espectro de Baixa Frequência na Presença de Fenômenos e Operações Comuns ao Sistema

Esta seção aborda estudos de componentes harmônicos e inter-harmônicos na ocorrência de fenômenos e operações comuns aos sistemas de distribuição, seja em simultaneidade com uma FAI ou de modo isolado. Apesar do foco deste trabalho ser a proposição de um modelo e de um algoritmo de detecção baseados nas características das FAI e não na distinção de outros fenômenos, é importante traçar um cenário das características de alguns eventos comuns nos sistemas de distribuição para que se possa entender como eles podem ser distinguidos das FAI.

De modo geral, transitórios comuns aos sistemas elétricos possuem duração de poucos ciclos, assim, uma FAI pode ser diferenciada de outra anomalia transitória, já que a falta permanece por longos períodos [56].

2.2.4.1 Chaveamento de ramais de alimentador

A variação das frequências até o sexto harmônico (360 Hz) foi estudado [1] em situações de chaveamento de ramais do alimentador (apenas durante o transitório), com e sem a presença de FAI. Uma série de testes idênticos foi conduzida em campo para este evento. Foi encontrado que o chaveamento sem a ocorrência de falta eleva a presença tanto

de frequências harmônicas quanto inter-harmônicas no sistema. O chaveamento com a presença de FAI elevou ainda mais a presença das frequências harmônicas e inter-harmônicas. Esta constatação indica que o chaveamento de ramais não mascara as características de uma falta de alta impedância. Além do mais, os chaveamentos são transitórios de curta duração, ao passo que as FAI podem perdurar por longos períodos.

2.2.4.2 Chaveamento de bancos de capacitores

Em um estudo conduzido em [20], foi analisada a influência da inserção de um banco de capacitores de 1200 kvar, sem a ocorrência de FAI, num alimentador de 12,5 kV, a 4,8 km da subestação, em condições normais de operação. Observou-se um aumento significativo de amplitude no 5º, 8º e 19º harmônicos durante o período em que o banco estava operando. Neste ponto, uma importante ressalva deve ser feita: quando um banco de capacitores está presente em um sistema de distribuição, alguns componentes do espectro de frequência são potencializados, outros são eliminados ou reduzidos, a depender da potência e da localização do banco instalado [20]. Os valores podem servir de referência, mas deve ser tomada a devida cautela de proceder com o estudo do conteúdo espectral para cada sistema em análise.

A influência da inserção de bancos de capacitores no espectro de baixa frequência, durante ocorrência de FAI, foi estudado em [1]. Foi encontrado que, estando o sistema em condição faltosa, os componentes inter-harmônicos apresentam aumento no momento dos chaveamentos, como uma resposta ao impulso da inserção e retirada do banco, mas seus valores permaneceram quase inalterados quando medidos antes do chaveamento e durante a operação dos bancos de capacitores. As frequências harmônicas apresentaram elevação de amplitude, mais evidentes nos casos da terceira (180 Hz) e quinta (300 Hz) ordem durante a operação dos bancos, mantendo o aumento de amplitude enquanto o banco de capacitores estiver ligado.

Os estudos feitos em [1] e em [20], estão de acordo com o artigo [56], no qual observou-se a influência do 3º e 5º harmônicos, assim como das frequências inter-harmônicas de 270 Hz e 150 Hz. Foi constatado que as frequências harmônicas permanecem com sua energia amplificada enquanto o banco fica conectado ao sistema. As frequências inter-harmônicas acusam o chaveamento, tanto na entrada quanto na saída, mas não permanecem durante o período de operação do banco.

Em conclusão, a influência da inserção de bancos de capacitores sobre o espectro harmônico da corrente no sistema é função da localização e potência do banco. Ainda, os componentes inter-harmônicos são afetados nos períodos da conexão e desconexão do

banco e os harmônicos durante o período de operação. Para a distinção deste evento, em comparação às FAI, podem-se observar frequências inter-harmônicas, que apresentam elevação transitória no chaveamento dos bancos de capacitores, ao passo que nas FAI, o aumento da energia destes componentes perdura por períodos mais longos.

2.2.4.3 Mudança de tap de transformador sob carga

As frequências até 360 Hz foram observadas quando, durante uma FAI, é executada uma mudança de tap de transformador sob carga [1]. Não foi observada variação significativa na composição espectral durante este tipo de evento, tanto para componentes harmônicos quanto para inter-harmônicos.

Do estudo de operações comuns aos sistemas de distribuição apresentados na seção 2.2.4 entende-se que é possível diferenciar e detectar as FAI na presença dos mesmos. A dinâmica do arco modifica o espectro de frequências da corrente de modo progressivo, intermitente e não transitório. Posto isso, o algoritmo de detecção terá como critério, entre outros parâmetros, a variação temporal das características das FAI.

2.3 Espectro de Alta Frequência

Antes do estabelecimento do arco é comum que ocorra o fenômeno de centelhamento, caracterizado por uma sequência rápida de rompimentos momentâneos do dielétrico [8]. O centelhamento causa o aparecimento do Espectro de Alta Frequência (EAF). A banda na qual o EAF se insere vai de 2 kHz [12], [60] a 10 kHz [25], [62].

Em [20], de oscilografias de FAI, é posto que, acima do 16º harmônico, as frequências começam a ter características semelhantes ao ruído branco (esta característica também é citada em [56]). Além desta faixa de frequência possuir característica de ruído, tem baixa amplitude, tornando difícil detectá-la. Ainda, os bancos de capacitores proporcionam um caminho de baixa impedância para os ruídos de alta frequência, atenuando sua presença no sistema elétrico [61].

A leitura do EAF depende de equipamentos de medição com elevada taxa de amostragem, encarecendo a identificação da falta. Além disso, chaveamentos e transitórios no sistema geram frequências similares às altas frequências das FAI [56]. Pelos motivos apresentados o algoritmo de detecção analisará as frequências do EBF em detrimento ao EAF, o qual não apresenta forte apelo na literatura.

2.4 Ensaio em Campo e Medições Laboratoriais

Nas seções 2.1 a 2.3 foram estudados o início e a evolução das faltas de alta impedância, desde o rompimento do cabo até seu estabelecimento. Foi explicada a formação do arco elétrico, suas características e como o meio (tipo de solo, umidade, salinidade e temperatura) influencia na sua dinâmica. Características dos sinais no tempo e na frequência foram estudadas para servir de parâmetros para a futura etapa de detecção.

Esta seção tem por intento a análise da falta do ponto de vista oscilográfico, visual. Não existe aqui a pretensão de equacionar ou buscar parâmetros das características das FAI, apenas fornecer material de experimentos reais, para que o leitor se familiarize com o sinal de uma FAI. O termo “assinatura” da forma de onda, muito utilizado na análise de sinais, remete ao fato de eventos possuírem características marcantes, que, salvo o rigor matemático, podem ser percebidas por observação das oscilografias.

Posto isso, além da verificação pelo algoritmo de detecção das características geradas pelo modelo, os sinais dos experimentos em campo e em laboratório abordados nesta seção, servirão de comparação para que, no momento em que o modelo de FAI for empregado, seja possível dizer se as simulações apresentam resultado satisfatório.

Um ensaio em campo [8] foi conduzido na Universidade de São Paulo (USP), no Instituto de Energia e Ambiente (IEE), para a análise de FAIs. Uma fonte de 220 V, ligada a um transformador elevador monofásico de 13,8 kV, com uma potência de curto-circuito de 30 kA, foram utilizados no esquema de montagem da Figura 11.

Figura 11 - Esquema elétrico e de medição dos ensaios de FAI. *Fonte:* [8].

Para este estudo, um cabo de alumínio nu com alma de aço, 1/0 AWG, foi lançado ao solo gramado. As conclusões foram: a corrente média de falta resultou em 57 A. A resistência média de falta em 99 Ω . O trabalho salienta que o valor de corrente está um

pouco acima da média para o solo brasileiro, já que o valor da resistividade do solo no local da medição é baixo se comparado ao do solo nacional. A distorção da onda de corrente, portanto, não é tão evidente, assim como os fenômenos de *buildup* e *shoulder*. A Figura 12 exibe a oscilografia da corrente de um dos testes.

Figura 12 - Corrente de falta. *Fonte:* [8].

A característica não linear desta falta fica mais evidente na Figura 13, em que é desenhada a curva tensão-corrente.

Figura 13 - Curva VxI de FAI. *Fonte:* [8].

Em [4], uma montagem laboratorial, utilizando um transformador monofásico com tensão de secundário de 11 kV foi elaborada para obter oscilografias da corrente de falta de alta impedância em solo arenoso e solo de terra retirada de campo gramado, misturado

a galhos secos. Ainda, foram obtidas oscilografias de falta por contato indireto em galhos e folhas.

A Figura 14 mostra uma foto da falta sendo aplicada em solo arenoso e, ao lado, a oscilografia da corrente gerada. Devido à forma de onda apresentada ser um recorte do período de regime permanente da FAI, não é possível analisar o *buildup* e o *shoulder*. Mesmo assim, é possível notar o patamar de corrente que ocorre antes do efeito avalanche, período que a corrente não aumenta ou diminui até que haja ignição do arco. Além dessa característica, observa-se assimetria entre os semiciclos.

Figura 14 - Experimento de FAI em solo arenoso. Fonte: [4].

A Figura 15 exibe a oscilografia e uma foto da falta sendo aplicada a terra. É possível perceber, mesmo sem a obtenção do espectro de frequências, que as duas oscilografias se assemelham (Figura 14 e Figura 15). Verifica-se que, no caso da falta aplicada na terra, existe um ruído de alta frequência, não presente visivelmente na areia. É claro o efeito avalanche, que se manifesta na transição do período em que a corrente possui valor nulo para o início da formação do arco e condução da corrente de falta. Também é evidente, em ambos os casos, a assimetria entre os semiciclos.

Figura 15 - Experimento de FAI em solo de terra. Fonte: [4].

A Figura 16 exibe uma falta aplicada por contato direto em um galho. Apesar de pequena, é possível perceber alguma distorção.

Figura 16 - Experimento de FAI em galho. *Fonte:* [4].

A falta aplicada em galho, com o ponto de contato sendo a folha (contato indireto), é mostrada na Figura 17. Pela análise da oscilografia, nota-se que as características de uma FAI causada por contato indireto se assemelham às causadas por contato direto.

Figura 17 - Experimento de FAI em folha. *Fonte:* [4].

Em [55], um experimento laboratorial foi montado conforme mostra a Figura 18. A tensão de 7200 V foi aplicada a terra gramada. A forma de corrente da FAI é exibida na Figura 19.

Figura 18 - Diagrama do circuito da montagem laboratorial. *Fonte:* [55].

Figura 19 - Corrente de FAI em gramado. *Fonte:* [55].

Neste experimento ainda foram estudadas faltas em solos com diferentes umidades. A Figura 20 mostra as formas de onda de tensão e corrente em solo seco. A Figura 21 mostra os mesmos sinais de FAI em solo molhado.

Figura 20 - Corrente e tensão de FAI em solo seco. *Fonte:* [55].

Figura 21 - Corrente e tensão de FAI em solo molhado. *Fonte:* [55].

É possível notar, como já explicado neste documento, que a falta de alta impedância em solo molhado apresenta maior valor de corrente e menor presença de arco, portanto menor distorção.

Os sinais apresentados nesta seção fornecem comprovação visual e melhor entendimento da teoria previamente apresentada. Na seção 5.1.9 serão apresentados resultados de simulações com o modelo elétrico proposto. Esta seção (2.4), portanto, servirá de base para comparação visual do resultado obtido pelo modelo com as oscilografias aqui apresentadas.

Para servir como base de consulta rápida, a Tabela 6 resume as características das faltas de alta impedância, apontando suas causas, consequências, propriedades e valores típicos.

Tabela 6 - Resumo das Características das FAI.

Característica da FAI	Causa	Consequência	Propriedade analisada	Descrição e valor típico
Ruptura do condutor	Intempéries, fadiga mecânica	Queda do condutor e contato com o solo	Tempo de queda	1,28 s
Corrente de falta	Início do arco	Existência de corrente	Valor eficaz	0 a 75 A
Ignição do arco	Contato com o solo, presença de umidade	Início do arco	Comportamento e tempo de existência do arco	Aleatoriamente variável. 1 a 160 ciclos
Extinção do arco	Evaporação da água no solo, formação de fulguritos	Arco deixa de existir	Comportamento e tempo de extinção do arco	Aleatoriamente variável. De 1 (um) a indeterminados ciclos
Ruptura dielétrica	Ionização do meio	Início do arco	Comportamento e principal harmônico	Aleatoriamente variável. 3º harmônico
Assimetria entre semiciclos	Presença de sílica e umidade no solo	Amplitude diferente entre semiciclos	Comportamento e principal harmônico	Aleatoriamente variável. 2º harmônico
<i>Buildup</i>	Redução da impedância do meio	Aumento do valor eficaz da corrente	Comportamento	Crescimento logarítmico, duração aleatória
<i>Shoulder</i>	Impedância do meio não varia durante alguns ciclos	Formação de patamares de corrente	Tempo de duração	Aleatório
Modulação da corrente de falta	Variação da resistência do arco	Inserção de componentes inter-harmônicos	Comportamento e principais frequências	Aleatoriamente variável. Faixa entre 40 e 80 Hz
Espectro de baixa frequência da corrente de falta	Assimetria, ruptura dielétrica	Frequências menores que 2 kHz	Comportamento e principais frequências	Aleatoriamente variável. 2º, 3º, 4º, 5º, 6º, 7º, 9º e 11º harmônicos
Espectro de alta frequência da corrente de falta	Centelhamento	Frequências entre 2 e 10 kHz	Propriedades do espectro	Baixa amplitude. Comportamento de ruído branco

3 Modelos Elétricos para Faltas de Alta Impedância

Para que os resultados obtidos nas simulações de sistemas elétricos sejam confiáveis, é imprescindível dispor de modelos que representem componentes, tais como chaves, transformadores, motores e linhas de transmissão, do modo mais preciso possível. Do mesmo modo, é necessário que eventos, como as faltas de alta impedância, sejam cuidadosamente estudados para que se possa ter uma representação fiel do seu comportamento.

As FAI com presença de arco voltaico são fenômenos complexos, que apresentam assimetria e comportamento aleatório e não linear [63], além de dependerem das condições do meio na qual ocorrem. Posto isso, um modelo que busque reproduzir as características complexas de uma FAI é necessário para o desenvolvimento bem fundamentado de algoritmos de detecção.

Diversos modelos têm sido propostos na literatura, abrangendo desde os modelos mais simples, como os resistivos [19], que não tinham a pretensão de representar o arco voltaico, até modelos mais complexos [10], controlados por linguagens de programação, permitindo uma representação mais completa e detalhada do fenômeno. Neste capítulo serão apresentados os modelos de FAI. Serão comentadas suas vantagens, desvantagens e sua capacidade de representar o fenômeno estudado.

3.1.1 Modelo 1

Este é o modelo mais simples de uma falta de alta impedância [8]. É apenas uma resistência conectada entre o ponto de falta e a terra, como mostra a Figura 22. Por não gerar nenhum tipo de distorção na forma de onda de corrente, este modelo não é suficiente para representar faltas de alta impedância com presença de arco, visto que este último fenômeno apresenta comportamento não linear.

Figura 22 - Modelo 1.

3.1.2 Modelo 2 [43] (Modelo de Emanuel)

Proposto em 1990 [43], conhecido como modelo de Emanuel, é resultado do estudo de medidas de faltas de alta impedância feitas em campo e de um experimento laboratorial com FAI em solo arenoso, conduzidas no mesmo trabalho. Sua configuração pode ser vista na Figura 23.

Figura 23 - Modelo 1990. *Adaptado de:* [43].

É possível, com este modelo, representar o controle da amplitude da corrente da falta por meio da impedância formada pelo resistor em série com o indutor. A escolha de diferentes valores das fontes de tensão contínua (CC) tem o papel de simular o efeito avalanche, uma vez que só permitem a passagem da corrente no ramo quando a tensão da rede ultrapassar as tensões por elas estabelecidas em seus respectivos semiciclos. Como estas fontes são independentes, é possível representar a diferença entre a tensão de ruptura dielétrica em cada semiciclo, imitando o comportamento da sílica agindo como emissor de elétrons no semiciclo positivo. Uma vez iniciada a condução, a impedância é equivalente para os dois ramos. Os diodos são ideais e têm o papel de evitar contribuição de corrente das fontes no ramo oposto. O espectro de alta frequência, os efeitos de *buildup* e *shoulder* não podem ser representados. Ainda, uma vez que todos os ciclos são iguais,

não há geração de componentes inter-harmônicos e, portanto, não é possível contemplar a faixa espectral de baixa frequência em sua totalidade.

Como será apresentado, baseados neste arranjo, muitos autores estudaram e propuseram modelos para as faltas de alta impedância com a presença de arco voltaico. Os esforços se concentraram em completar o modelo, buscando representar os fenômenos que este não foi capaz de reproduzir.

3.1.3 Modelo 3 [64]

Proposto em 1993 [64], apresenta, em comparação com o modelo de Emanuel, resistências não lineares, e elimina a impedância formada pelo resistor e indutor. A flexibilidade de elaboração das curvas tensão-corrente das resistências, aliada ao fato de ser possível fazê-las de modo independente entre si, agrega diversos benefícios: por meio do modelo de resistência não linear, a curva tensão por corrente pode ser elaborada ponto a ponto. Com ela é possível obter maior controle sobre a assimetria entre os semiciclos de corrente, incluindo, portanto uma faixa de espectral mais completa em relação ao modelo de Emanuel. Porém, ainda como no modelo antecessor, não se pode construir o efeito de *buildup* e *shoulder*, já que a resposta de corrente é a mesma para todos os ciclos. Este modelo também privilegia o espectro de baixas frequências gerado pelas FAI, sem a geração de componentes inter-harmônicos. A Figura 24 exibe a configuração proposta.

Figura 24 - Modelo 1993. Adaptado de: [64].

3.1.4 Modelo 4 [65]

Em [65] foi proposto um modelo composto por 16 impedâncias não lineares, ligadas em paralelo, as quais podem ter seus valores de resistência variando de zero a 5000 ohms

a cada semiciclo da forma de onda da tensão. O artigo sugere que, para cada caso a ser analisado, sejam combinadas as impedâncias de modo a simular a FAI. A escolha dos valores e combinações exatas torna a configuração do modelo complexa e de difícil aplicação, já que necessita de muitos testes e estudos para chegar a um modelo que apresente um resultado aceitável [8]. Portanto, este modelo não se apresenta viável ao uso em simulações.

3.1.5 Modelo 5 [66]

Proposto em [66] e utilizado em [67], é um modelo baseado na corrente associada ao arco elétrico. Uma impedância não linear, duas fontes com tensão variando no tempo (S_1 e S_2), e chaves controladas pelo componente TACS (*Transient Analysis of Control Systems*) do programa de simulação *Alternative Transients Program* (ATP) [68] compõem este modelo, mostrado na Figura 25.

Figura 25 - Modelo de 1998. *Adaptado de:* [66].

As chaves 1 e 2 são chaves controladas por tempo, com o papel de isolar o alimentador da carga e conectá-lo ao ponto de falta. A chave 3 controla a extinção e reignição do arco. Sua operação é dependente de dois parâmetros: Ta e Δt , em segundos, sendo que Ta é o tempo entre o cruzamento por zero da tensão no ponto de falta até a reignição do arco, dado pela equação (2), e Δt é o tempo de condução do arco em meio ciclo, conforme a equação (3). A velocidade angular ω tem unidade (rad/s).

$$Ta = \frac{1}{\omega} \text{sen}^{-1} \frac{V_r}{V_m} [s] \quad (2)$$

$$\Delta t = \frac{\pi V_r + 2\sqrt{V_m^2 - V_r^2}}{\omega(V_a + V_r)} [s] \quad (3)$$

A tensão no ponto de falta, equação (4), é considerada como:

$$v = V_m \text{sen}(\omega t) [V] \quad (4)$$

Sendo: V_r é a tensão de reignição do arco, V_m é o valor de pico da tensão no ponto de falta e V_a é a tensão de arco. A resistência não linear R controla a amplitude da corrente de falta. As fontes $S1$ e $S2$ são do tipo dente de serra, com linearidade crescente e decrescente, podendo representar melhor a característica dinâmica tensão-corrente do que fontes CC [66].

Este modelo pode ser visto como uma evolução no modelo de Emanuel [43]. A resistência não linear permite o controle da assimetria de corrente entre os semiciclos com mais detalhe. As fontes com linearidade variável permitem alguma variação nos pontos de ignição do arco, ainda que de modo determinístico. Este modelo não representa os fenômenos de *buildup*, *shoulder* e geração de altas frequências.

3.1.6 Modelo 6 [10]

Apresentado em 2001 [10], utilizado em [8] e em [9], é uma evolução na representação das faltas de alta impedância em respeito ao controle de parâmetros. Este modelo foi validado por meio de dados coletados de trinta e dois experimentos em um sistema de distribuição de 22,9 kV, amostrados a 10 kHz, pela *Korea Electric Power Corporation* (KEPCO). Os dados foram coletados nos ramos faltosos, portanto, contemplam apenas a corrente de falta, não a corrente necessária para suprir as cargas do sistema de distribuição em questão.

A Figura 26 exibe o modelo, composto pela associação em série de duas resistências variáveis no tempo, controladas por TACS.

Figura 26 - Modelo 2001. *Fonte:* [10].

A resistência $R1(t)$ é utilizada para modelar as características não lineares da corrente e possui as mesmas características em todo ciclo, desde o início da falta até o estado de regime permanente. A resistência variável $R2(t)$ é utilizada na modelagem dos fenômenos de *buildup* e *shoulder* [10]. A soma das duas resistências em um instante de tempo representa o valor total da resistência de falta, ou seja:

$$R(t) = R1(t) + R2(t)[\Omega]. \quad (5)$$

3.1.6.1 Expressão de $R1(t)$

A resistência $R1(t)$ possui característica periódica e é definida como sendo a razão entre a tensão e a corrente no tempo t , obtidas para um ciclo de tensão e corrente em regime permanente. De outro modo, num determinado instante de tempo, de posse da leitura do valor de tensão, utiliza-se a curva de assimetria, Figura 27, para obter a corrente e então calcular a resistência.

Devido a cada ponto de tensão corresponder a dois pontos ou valores de corrente, é utilizada a derivada da tensão para fazer a distinção entre eles. Um valor positivo para a derivada indica então um aumento da tensão, e um valor negativo a redução da tensão. A curva de assimetria, Figura 27, retirada de [8], mostra a característica não linear. Neste gráfico, a curva vermelha corresponde à derivada positiva, ou seja, ela é o sentido de subida. A curva azul segue o sentido de redução de tensão.

Figura 27 - Característica tensão-corrente de FAI. *Fonte:* [8].

Se a tensão do ramo faltoso estiver na faixa definida em (6), a corrente correspondente será obtida por meio da expressão (7), que calcula a corrente atual como interpolação simples dos valores de tensão e corrente.

$$v_n \leq v(t) < v_{n+1} \quad (6)$$

$$i(t) = i_n + \frac{i_{n+1} - i_n}{v_{n+1} - v_n} (v(t) - v_n) [A] \quad (7)$$

Assim, a expressão da resistência $R1(t)$ é a seguinte:

$$R1(t) = \frac{v(t)}{i(t)} = \frac{v(t)}{i_n + \frac{i_{n+1} - i_n}{v_{n+1} - v_n} (v(t) - v_n)} [\Omega]. \quad (8)$$

Caso contrário, se $v(t) = v_n$, $i(t) = i_n$ e a resistência continua sendo calculada pela razão entre a tensão e a corrente.

3.1.6.2 Expressão de $R2(t)$

A resistência $R2(t)$ é utilizada para modelar a envoltória crescente da corrente de falta, caracterizando os fenômenos de *buildup* e *shoulder*. Seu valor inicia elevado e decresce ao longo do tempo, permitindo o aumento da corrente, até atingir valor nulo. Ela é calculada para os instantes de tempo nos quais a tensão e a corrente atingem seus valores de pico. Em [69], para $R2(t)$, é proposta a seguinte expressão:

$$R2(t) = \alpha e^{-\beta t} [\Omega]. \quad (9)$$

Os valores foram escolhidos para que a função apresentasse a melhor aproximação com os resultados de medidas obtidas por ensaios feitos em campo. São elas: $\alpha = 989,54$ e $\beta = -22,45$.

Além da expressão (9), também é proposta a seguinte:

$$R2(t) = \frac{\alpha}{1 + \beta t} + \gamma t \text{ } [\Omega] \quad (10)$$

Também provenientes de medidas experimentais, os valores dos parâmetros são: $\alpha = 1349,76$ e $\beta = 70,52$ e $\gamma = -290,49$. Na escolha de $R2$ é possível utilizar (9) ou (10), já que elas foram deduzidas de dados experimentais. A escolha por uma ou outra reproduzirá a envoltória relacionada às medidas do trabalho no qual elas foram deduzidas.

Este modelo representa de forma satisfatória a maioria das características das FAI. Fica faltando o centelhamento, responsável pelos componentes de alta frequência e a intermitência, produzindo extinções e reignições aleatórias. O modelo emprega duas equações, uma para cada resistência, cujo cálculo depende de dados experimentais de tensão e corrente, portanto, é, de certo modo, limitado no que diz respeito à variação temporal de parâmetros, ou seja, para a representação de arcos com diferentes propriedades são necessários dados novos, portanto, não se pode gerar grande número de simulações com diferentes tipos de arcos. Este modelo foi aprimorado em [70] com o uso de dados de faltas reais em diferentes superfícies de contato.

3.1.7 Modelo 7 [71]

Proposto em [71], é uma modificação do modelo de Emanuel [43], pela substituição da impedância série por um resistor não linear, como pode ser visto na Figura 28. O autor varia de modo aleatório a tensão das fontes CC a cada meio ciclo da forma de onda de tensão de falta, com o propósito de simular diferentes tensões de início de condução do arco. Com isso, é possível obter algum efeito de modulação da amplitude da corrente de falta, que acaba estando vinculada à tensão de ignição do arco, por consequência, se torna uma desvantagem, já que a literatura não aponta que estes parâmetros estejam diretamente relacionados. A representação de *buildup* e *shoulder* ficam comprometidas. Ainda, não há representação do centelhamento e intermitência.

Figura 28 - Modelo 2004. *Adaptado de:* [71].

3.1.8 Modelo 8 [72]

Proposto em [72], este modelo é baseado na descrição de Hochrainer [73], a qual se fundamenta no balanço de energia no arco, descrito na equação (11).

$$\frac{dg(t)}{dt} = \frac{1}{T}(G(t) - g(t)) \quad (11)$$

Equivalente à função de transferência descrita pela equação (12):

$$\frac{g(s)}{G(s)} = \frac{1}{Ts + 1} \quad (12)$$

Sendo:

- $g(t)$: Condutância do arco dependente do tempo.
- $G(t)$: Condutância estacionária do arco.
- T : Constante de tempo.

A condutância estacionária do arco é expressa do seguinte modo:

$$G(s) = \frac{|i(t)|}{(u_p + R|i(t)|)l_p}, \quad (13)$$

sendo:

- $i(t)$: Corrente do arco.
- u_p : Parâmetro de tensão constante por comprimento de arco.
- R : Resistência por comprimento de arco. Valor utilizado: $9 \Omega/\text{cm}$.
- l_p : Comprimento do arco. Valor utilizado: 10 cm.

A Figura 29 mostra o modelo desenvolvido no programa de simulação ATP. O valor da resistência variável é controlada pela linguagem de programação MODELS, disponível no ATP.

Figura 29 - Modelo 2005. Fonte: [72].

A resistência linear representa a resistência do caminho da corrente ao solo. A resistência não linear representa a dinâmica da resistência do arco. As fontes CC simulam o efeito avalanche e as fontes CA são utilizadas para variar a tensão de ignição e extinção do arco. Neste modelo, a variação do valor das fontes CA tem valores determinados, portanto, a variação da tensão de extinção do arco não é aleatória, assim como as modulações. Uma vez que a condutância é calculada com base na corrente que percorre as resistências, que por sua vez depende da tensão no ponto de falta, que se repete a cada ciclo, a amplitude, salvo pequenas modulações forçadas pelas fontes CA, não varia de modo a representar os fenômenos de *buildup* e *shoulder*. Além disso, as altas frequências não fazem parte das características da corrente de falta gerada pelo modelo.

3.1.9 Modelo 9 [41]

Apresentado em [41], utilizado em [28], é uma modificação dos modelos propostos em [43] e [64]. Representa a impedância de falta por meio de resistências nos ramos paralelos. A Figura 30 ilustra o modelo proposto.

Figura 30 - Modelo 2006. *Adaptado de:* [41].

Em relação ao modelo de 1990 [43], adquire-se a capacidade de controlar a assimetria entre os semiciclos de corrente de forma mais detalhada, uma vez que as resistências podem assumir valores diferentes. Já em relação ao modelo de 1993 [64], há um ganho na facilidade da escolha de parâmetros, já que a resistência é linear, porém, perde-se a capacidade de controlar de forma mais precisa a relação tensão-corrente. A capacidade de representar o espectro de alta frequência, intermitência e o fenômeno de *buildup* e *shoulder* não é considerada.

3.1.10 Modelo 10 [32]

Apresentado em [32], modela a FAI por meio da associação em paralelo do modelo de [41], como mostra a Figura 31.

Figura 31 - Modelo 2010. Fonte: [32].

Neste trabalho, a técnica para simulação da falta de alta impedância utilizada reúne a vantagem de empregar um modelo de fácil parametrização, com um método simples (chaveamento), que tem por finalidade representar a aleatoriedade do arco utilizando chaves estatísticas do ATP, cujo tempo de fechamento e abertura são controlados por distribuições probabilísticas, tal como Gaussiana. A Figura 32 mostra o sinal de corrente de uma das simulações geradas com esse modelo.

Figura 32 - Sinal de corrente do modelo 2010. Fonte: [32].

Este modelo consegue representar o efeito avalanche, assimetria e algum tipo de modulação do sinal. O problema com este modelo reside no fato de que as chaves são controladas por uma função de probabilidade que pode resultar em não refletir o tempo em ciclos que faltas reais apresentam, tanto em período de condução quanto em extinção, assim como as modulações, que, por serem aleatórias, dificilmente serão combinadas de modo que a corrente de falta represente o *buildup* e o *shoulder*. O centelhamento é outra característica não representada.

3.2 Considerações Finais Sobre o Capítulo

Dos modelos apresentados, os baseados em diodos, sem nenhum tipo de controle [41], [43], [64], [71], de modo geral, têm a capacidade de reproduzir o espectro harmônico de baixa frequência. Estes modelos não retratam a aleatoriedade característica da corrente de falta das FAI, não reproduzem componentes inter-harmônicos, *buildup*, *shoulder*, componentes de alta frequência e intermitência.

Dos modelos que incorporam algum tipo de controle, [10], [32], [66], [72], todos são capazes de representar as características dos modelos baseados em diodos e, é possível que os fenômenos de *buildup* e *shoulder* também sejam representados, como é o caso do sexto modelo [10]. As modulações responsáveis pelo surgimento de componentes inter-harmônicos, em nenhum dos modelos foi desenvolvida de forma a ser completamente aleatória e, ao mesmo tempo reproduzir de modo realista a natureza do arco sem necessitar de pontos de medições reais para a elaboração das equações de controle. No modelo 7 [71] e no modelo 8 [72], por exemplo, elas são consequência da variação do valor das fontes de tensão em série com os diodos. No modelo 10 [32], apesar de aleatória, as modulações são limitadas ao número de ramais em paralelo e não necessariamente reproduzirão as modulações de modo satisfatório, principalmente em relação à formação de *buildup* e *shoulder*. A intermitência, aleatoriedade e as componentes de alta frequência ainda não são representadas nestes modelos. A Tabela 7 resume as características de cada modelo, elencando o que este é capaz ou não de representar de modo satisfatório, ou seja, de modo próximo ao real.

Posto isso, este trabalho propõe, na seção 5, um modelo elétrico para faltas de alta impedância, que objetiva a reprodução do espectro de baixas frequências, as características de *buildup* e *shoulder*, assimetria entre semiciclos, intermitência do arco e modulações aleatórias para a reprodução do espectro inter-harmônico. Também é escopo do modelo proposto fornecer ao usuário o controle dos parâmetros, de modo que este consiga reproduzir diferentes tipos de sinais de falta presentes na literatura.

TABELA 7 - RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS REPRESENTADAS DE MODO SATISFATÓRIO POR CADA MODELOS DE FAI.

Característica da FAI	Modelo 1 [8]	Modelo 2 [43]	Modelo 3 [64]	Modelo 4 [65]	Modelo 5 [66]	Modelo 6 [10]	Modelo 7 [71]	Modelo 8 [72]	Modelo 9 [41]	Modelo 10 [32]
Ruptura dielétrica	não	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim
Assimetria	não	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim
Variação de assimetria aleatória	não	não	não	não	não	não	não	não	não	não
<i>Buildup</i>	não	não	não	não	não	sim	não	não	não	não
<i>Shoulder</i>	não	não	não	não	não	sim	não	não	não	não
Centelhamento	não	não	não	não	não	não	não	não	não	não
Intermitência	não	não	não	não	não	não	não	não	não	não
Modulação aleatória	não	não	não	não	não	não	não	não	não	não

Cabe ressaltar que o modelo 1 [8] é uma resistência linear, portanto, apesar de não representar o arco elétrico é capaz de simular a amplitude da corrente de falta.

4 Detecção das Faltas de Alta Impedância

Apresentados os modelos elétricos de FAI, este capítulo apresenta a revisão literária das técnicas de detecção de FAI com foco em ferramentas matemáticas, tal como análise harmônica por meio da transformada de Fourier.

4.1 Algoritmos e Métodos para Detecção das Faltas de Alta Impedância

A detecção de faltas de alta impedância por métodos clássicos recai, principalmente, sobre a análise e manipulação das relações entre características extraídas dos sinais de tensão e corrente do defeito [6]. Estas relações podem ser feitas com parâmetros da falta no domínio da frequência, do tempo ou de uma relação entre eles. No primeiro, pode ser investigada a contribuição de cada harmônico, individualmente, ou de um conjunto deles. Pode ser observada sua amplitude absoluta e relativa, seja ao componente fundamental ou a outro componente no sinal. Dos parâmetros temporais, podem ser analisados e relacionados: tempo de evolução e extinção da falta, duração total e entre períodos de reignição do arco, tempo de ignição do arco e relações entre todos estes parâmetros, como será visto nesta seção. Conciliando estas duas formas de análise, é possível tanto estabelecer novas relações matemáticas entre estes componentes, como valer-se de relações já conhecidas, sendo então possível estudar diversos modos pelos quais uma FAI pode ser caracterizada e distinguida de outros fenômenos.

Historicamente, o estudo da detecção das faltas de alta impedância data de meados de 1949 [78]. Em [2] foi introduzida a proteção mecânica, na qual, no momento da queda, era aproveitada a força do condutor que, por meio de um mecanismo montado na cruzeta do poste abaixo de cada fase, acionava uma mola, a qual liberava um barramento solidamente aterrado, criando um caminho de baixa impedância para que a corrente de falta fosse elevada e acionasse os relés de sobrecorrente antes que o condutor tocasse o solo. Como este mecanismo necessitava ser instalado em todos os postes para que fosse um

método eficiente, tornou-se uma solução inviável. Em outra proposta de detecção [79] estudou-se a possibilidade de diminuir o valor da corrente de disparo dos relés convencionais, porém, esta prática acaba por gerar interrupções inesperadas, inviabilizando a técnica.

Em [80], por meio de testes com dados de sinais reais, relés baseados em métodos de detecção diferentes foram analisados: relé de terra com algoritmo de compensação da variação da corrente de carga, relé com algoritmo de corrente de segundo harmônico e relé de corrente de terceiro harmônico. Ainda, foi comparado o desempenho destes relés com um relé convencional de sobrecorrente de terra, função 51N.

O relé de terra com algoritmo de compensação da variação da corrente de carga é um relé eletromecânico, proposto por [42]. Este relé era acionado pela amplitude da corrente de sequência zero. Para evitar falsos desligamentos, o equipamento utilizava o torque da bobina de operação variável, que acompanhava proporcionalmente o aumento da corrente de carga. Dos testes feitos, este relé detectou 86% das faltas. Apesar de a taxa de acerto ser alta, há de se ponderar que existe uma relação pré-estabelecida entre o valor da corrente de carga e o valor da corrente de sequência zero. Com a crescente instalação de cargas não lineares, a corrente de sequência zero possui grande variação na rede de distribuição, tornando este método inadequado.

Em sua comparação, [80] descreve que a premissa do relé com algoritmo de corrente de segundo harmônico é de que componentes de segunda ordem têm baixa participação no espectro de sistemas em regime permanente. Com a presença de arco este componente se eleva. O relé mede, portanto, a amplitude deste componente nas três fases e a compara com a amplitude da frequência fundamental. A principal deficiência deste algoritmo, considerando a sua aplicação nos sistemas de distribuição atuais, é que não há como prever um nível determinístico da amplitude do segundo harmônico em um sistema, assim como em uma FAI, visto que a poluição harmônica pode ser elevada devido ao aumento de cargas não lineares. As mesmas observações são aplicáveis ao relé de corrente de terceiro harmônico, apresentado neste mesmo trabalho, no qual apresenta concepção similar ao relé de segundo harmônico. Ambos os relés, tiveram taxa de acerto de 62% na detecção de faltas.

Por fim, na comparação feita em [80], o relé de sobrecorrente de terra detectou apenas 38,5% das faltas, sendo menos eficaz que os outros quatro. A baixa taxa de acerto se deve ao fato de que os relés de sobrecorrente de terra devem ter seus valores parametrizados em torno de 20 a 50% do valor da máxima corrente de operação para as fases, pois valores menores podem causar detecções errôneas [12]. Este ajuste acaba

resultando em uma larga região desprotegida. Em conclusão, segundo o próprio autor, os relés apresentados possuem defeitos não resolvidos e são influenciados por transitórios e variações de carga no sistema.

Em [81], é apresentada a detecção da falta de alta impedância por meio da medida da mudança no desbalanço da corrente em um sistema trifásico, medido para a componente fundamental, e da amplitude do 3º e 5º harmônicos, medidos da subestação. Testes com FAI em diferentes solos, com diferentes tipos de condutores, serviram de base de dados de informações sobre o comportamento dos componentes observados. Ficou evidente o aumento da amplitude das frequências analisadas. Por meio de uma ferramenta estatística, o teste de hipóteses, limites de amplitude para cada uma destas frequências foram determinados. A detecção era feita se este limite fosse ultrapassado. Os testes com o algoritmo proposto sugerem identificação promissora (90% de probabilidade de acerto). A solução se mostra eficiente, porém, algumas ressalvas devem ser feitas: apesar da utilização de mais de um harmônico conferir certa robustez à detecção, o algoritmo utiliza valores determinísticos de amplitude, inferidos de um conjunto de sinais, o que pode torná-lo particularizado para o sistema em análise. O autor descreve que a detecção não apresentou bons resultados para rejeições de carga (devido à queda do condutor) menores que 5% da carga total. Ainda, não foi possível detectar falta com correntes eficazes menores que 10 A. Este método pode ser melhorado com a utilização de faixas de valores de amplitudes dos harmônicos, além da utilização de critérios temporais, que podem excluir injeções de harmônicos causados por transitórios. Fica claro, deste estudo, que as correntes geradas por FAI possuem forte presença de componentes de 3ª e 5ª ordem.

Com o propósito de encontrar bons parâmetros no espectro de frequências das FAI, [20] propõe técnicas de identificação, quando da análise do conteúdo espectral. Sua análise, baseada em dados reais considerando solos úmidos e secos, investigou o aumento percentual da amplitude dos harmônicos entre os períodos de pré-falta em relação ao período de falta. Além disso, comparou o aumento em amplitude dos harmônicos pares em relação aos ímpares. Foi encontrado que os harmônicos ímpares são predominantes, tanto em solo seco como molhado, porém, as faltas em solo seco apresentaram conteúdo harmônico mais significativo, pois, devido à maior presença de arco, existe maior distorção da corrente. Em relação à amplitude, os harmônicos ímpares predominantes foram o 3º e 5º. Os pares com maior presença foram o 2º, 4º e 6º. Fica claro, deste estudo, que as correntes geradas por FAI possuem forte presença de componentes de 3ª e 5ª ordem.

Além destes, o autor propõe utilizar para a detecção, do 7º ao 14º harmônicos, tanto pares quanto ímpares, pois, ao passo que os harmônicos até o 6º tenham apresentado maior

valor absoluto, esta faixa foi a que apresentou maior aumento relativo entre período de pré-falta ao de falta. A Tabela 8 exhibe estes valores.

Tabela 8 - Comparação do aumento relativo dos harmônicos pares e ímpares. *Adaptado de:* [20]

	Solo Molhado	Solo Seco
Harmônicos Ímpares (7,9,11,13)	8,28	7,30
Harmônicos Pares (8,10,12,14)	45,1	9,07
Pares: Ímpares	5,40 : 1	1,24: 1

Não há resultados de aplicação deste estudo, porém, as análises indicam frequências e relações harmônicas como potenciais ferramentas na detecção de FAI. Do espectro de baixa frequência os potenciais harmônicos para a detecção vão da segunda à sexta ordem.

A detecção por meio destas relações aparenta ser uma boa técnica, porém, devido às cargas não lineares conectadas ao sistema, a detecção baseada em componentes harmônicos se torna difícil. Os componentes inter-harmônicos, entretanto, são um indicador mais confiável [12]. Em [56] é proposto observar os componentes próximos a 60 Hz, tanto harmônicos quanto inter-harmônicos. Segundo o autor, uma das vantagens das baixas frequências é que não são atenuadas por bancos de capacitores, ou confundidas com chaveamentos. Observando as frequências de 30, 60, 150 e 180 Hz em condições de FAI e as frequências 150, 180, 270 e 300 Hz durante chaveamento de bancos de capacitores, foi concluído o seguinte: com exceção do componente fundamental, os harmônicos e inter-harmônicos apresentaram variações significativas durante a falta. No chaveamento do banco de capacitores, as frequências harmônicas apresentaram ampliação durante todo o período em que o banco estava ligado e as inter-harmônicas aumentaram de amplitude apenas nos períodos em que o banco era chaveado. Conclusivamente, [56] propõe que se utilizem as frequências inter-harmônicas na detecção de FAI, já que elas perduram durante o fenômeno, mas não durante chaveamentos. O método não foi testado em um algoritmo de detecção.

Valendo-se da riqueza espectral gerada pelas FAI, um método de detecção proposto em [61] utiliza uma vasta banda de frequências na tentativa de identificar o distúrbio: harmônicos ímpares, pares, inter-harmônicos e componentes de alta frequência. A detecção é baseada no efeito cumulativo da soma das energias dos componentes num tempo estabelecido, deste modo, fazendo natural distinção de fenômenos transitórios, os quais não geram distorção por longos períodos de tempo. Não há indicações de valores e o

algoritmo não foi testado. Outro trabalho [44] aponta as inter-harmônicas como parâmetros relevantes na detecção de FAI. De medidas feitas em campo, em diferentes tipos de solo, num alimentador de 13,8 kV, foi extraído o espectro harmônico para estudo. Destes estudos, notou-se que, quanto maior a variação do comprimento do arco, maior a presença de componentes não harmônicos. Desta análise, o autor propõe dois índices para a detecção das FAI. No primeiro, utilizou a TDF para quantificar o valor eficaz de um conjunto de frequências, as quais considerou de maior representatividade, por apresentar maior amplitude. Este conjunto é composto por duas faixas de frequências: entre 40 Hz e 56 Hz e entre 64 Hz e 80 Hz. O índice proposto, chamado de IH, é calculado por meio de:

$$IH = \sqrt{\sum_{k=40}^{56} i_{hk}^2 + \sum_{j=64}^{80} i_{hj}^2} \quad (23)$$

Sendo:

- i_{hk} e i_{jk} — amplitudes das frequências inter-harmônicas da corrente, expressas como porcentagem da frequência fundamental.

A TDF é calculada para um sinal de 60 ciclos de duração. A detecção é feita por meio da comparação do índice com um limite de referência, deduzido das medidas em campo. O segundo método proposto pelos autores surgiu da necessidade de reduzir o erro introduzido pela TDF devido ao efeito conhecido como *picket-fence*, no qual as frequências contidas no sinal medido no tempo não são múltiplos inteiros da resolução em frequência da transformada [82]. Neste método são utilizados bancos de filtros para isolar as mesmas faixas de frequência do método anterior e então calcular o índice IH.

Em conclusão, a utilização de filtros na extração das frequências inter-harmônicas se mostrou mais precisa. Nos testes feitos com *hardware* próprio, o autor conseguiu detectar as faltas em um período de 1 a 17 s, dependendo do tipo de solo. Ainda, os testes foram feitos em um alimentador real, cuja carga à jusante do ponto de falta consumia 500 kVA, relativo a prédios comerciais. Foi encontrado que estas cargas não interferiam nas medições dos componentes inter-harmônicos, não comprometendo o método. Durante os testes nenhuma das proteções convencionais, empregadas pela concessionária de energia à montante do ponto de estudo, foi acionada. As conclusões obtidas neste trabalho afirmam e asseguram o uso das frequências intercaladas como um excelente indicador da ocorrência de FAI.

Técnicas baseadas no domínio do tempo também são utilizadas na tentativa de identificação de FAI. Em [55] valendo-se do comportamento errático da amplitude da corrente de falta e de sua assimetria, são utilizadas duas características na detecção:

- *Flicker*: diferença entre os valores de pico dos semiciclos de mesmo sinal em dois ciclos consecutivos.
- Assimetria: diferença entre os valores absolutos de pico dos semiciclos dentro de uma janela de um ciclo.

O método proposto calcula o valor eficaz de um ciclo, guarda como referência e compara com o valor do próximo ciclo. Caso a diferença ultrapasse um valor pré-estabelecido é disparado outro algoritmo, que calcula o *flicker* e a assimetria. No primeiro, obtêm-se as amplitudes de cada semiciclo do período atual e do anterior, então o *flicker* é calculado como sendo a diferença entre os valores de pico dos semiciclos de mesmo sinal, entre dois ciclos. Se duas medidas sucessivas apresentarem mudança de sinal maior que 5% do valor da corrente de carga, à variável *flicker* é atribuído um peso. Em uma janela de um ciclo, com passo de meio ciclo, a assimetria é calculada como sendo a diferença entre os valores de pico. Caso duas medidas consecutivas apresentem mudança de sinal, a variável ‘assimetria’ recebe o valor da assimetria. Esta variável só é utilizada caso o valor da variável *flicker* seja nulo.

O parâmetro de detecção é a integral da curva resultante do valor das variáveis ao longo do tempo. Se este valor ultrapassar um patamar estabelecido, é dada a detecção. O estudo concluiu que correntes de falta em solo molhado são menos distorcidas do que em solo seco, e que, com o início da falta em solos molhados, devido à dissipação de calor, o solo se torna cada vez mais seco pela evaporação da água nele presente, elevando a distorção da forma de onda e, portanto, facilitando a detecção pelo método proposto. O teste com sinais provenientes de curtos-circuitos, chaveamentos, transitórios e cargas não lineares de baixa corrente, como computadores e lâmpadas fluorescentes não interferiu na detecção, já que o algoritmo observa variação de amplitude e não apenas a amplitude dos semiciclos e, adicionalmente, espera confirmação de falta observando o sinal por períodos de tempo maiores que os eventos transitórios. Por fim, é concluído que, com exceção de sistemas com presença de solda a arco como carga, já que imita o comportamento das FAI, o método de detecção proposto é confiável.

Em [12] foi comentado ser possível utilizar os componentes de alta frequência (acima de 2 kHz) em conjunto com a utilização de parâmetros temporais, como mais um aliado na detecção de FAI, do seguinte modo: o arco é extinto quando a tensão no ponto de falta vai a zero. A partir deste ponto, quando a tensão ultrapassa um ângulo que possibilite o início do centelhamento, há de se detectar componentes de alta frequência durante o período de cada semiciclo da senoide nos quais há condução de corrente, como mostra a Figura 33.

Figura 33 - Sinal de alta frequência durante FAI. Fonte: [12].

Apesar de não haver resultados e testes no documento [12], além dos pontos que pesam à favor da utilização do espectro de baixa frequência, como já discorrido, a característica marca o fenômeno e pode ser usada como um parâmetro auxiliar no desenvolvimento do algoritmo de detecção.

Outro parâmetro no domínio do tempo, também não posto em prática, mas analisado como possível apoio na detecção, foi estudado em [4], é a duração em que a corrente de falta mantém seu valor nulo, ou seja, o tempo durante o qual não ocorre a ignição do arco. Estudaram-se diversos tipos de solo e encontraram-se valores médios para o semiciclo positivo que variam de 2,2 ms até 4,1 ms. Para o negativo, 2,4 ms a 4,3 ms. Este estudo, de forma isolada, não é interessante quando se deseja medir a corrente de falta na subestação, já que a corrente requerida pela carga, à montante do ponto de falta, não fará a corrente permanecer nula pelos períodos estudados. Porém, esta pesquisa complementa a anterior [12] do seguinte modo: componentes de alta frequência da corrente podem ser lidas da subestação. De forma isolada, estes componentes podem ser analisados quando do seu período de existência, comparado com os valores apresentados em [4]. Se o sinal estiver contido no intervalo estudado, há chances que seja resultado de uma FAI.

A energia contida nos sinais obtidos de diferentes níveis de decomposição do sinal temporal por meio da TW é uma ferramenta muito utilizada na detecção de faltas de alta

impedância. Em [75] é proposto, como índice de detecção, a equação (24), que calcula a soma absoluta do terceiro nível de decomposição da corrente, utilizando a wavelet mãe Daubechies 14 (db14), em um ciclo do sinal. Durante a simulação de uma falta, foi possível, nas três fases, observar elevação do coeficiente da equação (24) no momento da falta. A fase faltosa apresentou um índice em torno de 60% maior do que as fases sãs. Não foram estabelecidos limites para o coeficiente S a ser utilizado em outros casos. O trabalho apenas conclui que ele é um bom indicador. Ainda, este indicador não foi analisado perante perturbações, tais como chaveamento de bancos de capacitores ou energização de transformadores.

$$S(k) = \sum_{n=k-N+1}^k |D3(n)| \quad (24)$$

Sendo:

- N – Número de amostras da janela.
- k – Fim da janela.
- $D3(n)$ – Valor da amostra n no 3º nível de decomposição.

Em [83], o índice utilizado na detecção é resultado da equação (25), a qual utiliza dados obtidos com a wavelet mãe Daubechies 3 (db3) em seu quinto nível de detalhe, em uma janela deslizando de um ciclo.

$$S(k) = \sum_{n=k-N+1}^k |D5(n)| \quad (25)$$

Sendo:

- N – Número de amostras da janela.
- k – Fim da janela.
- $D5(n)$ – Valor da amostra n no 5º nível de decomposição.

Se o valor resultante for maior que 0,1 (adimensional), durante mais de 2 ciclos, é detectada a falta. Em conclusão o autor afirma que o método testado com dados reais de falta, produziu resultados expressivos, porém, não especifica a percentagem de acerto.

Em [84], foi proposto um detector de FAI baseado na energia dos coeficientes wavelet com distorção de borda. O método promete detecção mais rápida e confiável em comparação com os métodos baseados apenas na energia dos coeficientes da transformada. Os autores concluem que o método é eficiente mas que não funciona para FAI com correntes próximas a zero.

A maior parte dos trabalhos baseados na TW está relacionada a métodos híbridos, os quais utilizam a TW para extrair índices baseados na decomposição do sinal e então fazem uso de ferramentas inteligentes, estatísticas e outras complementares para trabalhar e estudar estes índices. Assim como as amplitudes das frequências obtidas pela TDF, podem ser comparados sinais de diferentes níveis obtidos pela TW, correlacionando-os, medindo suas proporções, entre outros.

Neste contexto, a utilização da TW pode ser encontrada em trabalhos como [5], [33], [41], [57], [67], [72], [77], [85]–[90].

4.2 Algoritmos Utilizados por Relés Comerciais

Apesar dos fabricantes dos relés comerciais não fornecerem informações detalhadas sobre os algoritmos de proteção por eles utilizados, os manuais trazem, de forma limitada, algumas informações sobre os métodos de detecção de FAI. Nesta seção serão apresentados relés das fabricantes: ABB, Schweitzer e General Electric (GE).

4.2.1 Relé REF550 – ABB

Segundo [9] o relé REF550 da ABB utiliza três sistemas individuais para detecção de FAI. Cada um dos algoritmos, apresentados na Figura 34, possui um nível de confiança diferente, que confere um peso à decisão de lógica de detecção.

Figura 34 - Sistema de detecção de FAI da ABB. Fonte: [9].

A transformada Wavelet utiliza o cálculo da energia do sinal contida em alguns dos detalhes extraídos para fornecer um peso à lógica de decisão. Em conjunto com as medidas estatísticas e a saída da rede neural, a lógica de decisão define se existe ou não uma FAI ocorrendo no sistema.

4.2.2 Relé SEL-451 – Schweitzer

Segundo o manual do fabricante [13], o relé SEL-451 analisa o conteúdo não harmônico das correntes de fase e residuais, os quais são utilizados para a detecção da FAI. Uma lógica de detecção adicional mede o índice de distorção total dos componentes harmônicos ímpares e armazena os histogramas de curto e longo prazo. Comparando a diferença entre o histograma de medidas históricas e o da medida atual, a função gera alarmes de falta. Quando a diferença entre dois histogramas não é substancial (valores não especificados pelo fabricante), este é armazenado na base de longo prazo, fazendo com que o histórico se adapte às condições da carga em tempo real no alimentador e aumenta a segurança na detecção. O fabricante deixa claro no manual que não é possível que sejam identificadas todas as faltas de alta impedância.

4.2.3 Relé F60 – General Electric (GE)

Segundo seu manual [91], o relé F60 da GE utiliza um conjunto de algoritmos coordenados por um sistema supervisor para cumprir com a detecção das faltas de alta

impedância. Estes algoritmos são o algoritmo de energia, de aleatoriedade, detecção de arco, análise espectral, detecção de carga e extrator de carga.

Se o sistema detecta a presença de arco, é determinado se este persiste por um período significativo de tempo. Caso positivo, determina se é proveniente de condutor rompido ou de toque indireto. Esta distinção é feita por meio da análise do início da corrente de falta: no caso de condutor rompido, esta análise indica perda de carga, do contrário, a linha é considerada intacta, mesmo com arco presente. Caso o arco seja persistente, a linha é desligada, caso o arco seja intermitente, causado, por exemplo, por toques de galhos em períodos esparsos de tempo, um sinal de evento suspeito é emitido. A detecção de um condutor rompido ou condição de arco é feita por meio da execução do algoritmo de energia, que monitora a energia de componentes não fundamentais presentes nas correntes de fase e neutro: harmônicos ímpares, pares e inter-harmônicos. Destes últimos as frequências são: 30, 90, 150, ..., 750 Hz.

O algoritmo detecta a presença de arco caso a energia de um conjunto destes componentes exceda um valor estabelecido (não explicitado no manual), por um determinado período de tempo. Então o sistema reporta a presença de arco para o algoritmo de detecção de arco.

O algoritmo de aleatoriedade monitora os mesmos componentes, procurando por uma elevação momentânea, seguida de variação errática em qualquer um dos componentes. Caso este comportamento seja detectado, o sistema reporta a presença de arco para o algoritmo de detecção de arco.

O propósito do algoritmo de detecção de arco é reunir as informações dos detectores básicos e atribuir um nível de assertividade por fase. Existem 24 detectores básicos, já que os algoritmos descritos analisam cada frequência em cada uma das fases e no neutro. O algoritmo de detecção de arco conta as indicações de arco de cada detector base durante um período de 30 segundos. Quanto mais indicações, maior a assertividade.

O algoritmo de análise espectral é o último estágio de confirmação de FAI e atua apenas quando certo nível de assertividade for atingido. Ele recebe 5 s do conteúdo harmônico médio da corrente residual e compara com curvas padrão. Dependendo da similaridade, é incrementado o nível de assertividade.

A detecção de carga examina, nas fases e neutro, o valor eficaz da corrente durante 2 ciclos. Ele sinaliza condição de sobrecorrente, perda de carga e alta taxa de variação de carga. As indicações são analisadas pelo algoritmo de análise de carga, que diferencia condutores rompidos de intactos.

O extrator de carga tenta calcular a carga sendo consumida na fase rompida durante a falta. Isso é feito da análise do sinal durante um período de tempo. Se for possível fazê-lo, ele remove a corrente de carga da corrente lida na fase faltosa, obtendo a corrente de falta, que é enviada ao identificador de padrão de ignição do arco, que tenta identificar a fase com defeito, por meio da correlação entre a medida da corrente de neutro e das tensões de fase. A fase defeituosa será aquela cujos picos de tensão se alinharem com as ignições de arco na corrente.

4.3 Considerações Finais Sobre o Capítulo

Este capítulo abordou métodos de detecção baseados na extração de características das faltas de alta impedância.

Não tão seguros, devido à baixa amplitude e dificuldade de medição, os harmônicos de mais alta frequência podem servir como auxiliares na detecção. Os harmônicos de 7º a 14ª ordem, apesar de apresentarem baixa amplitude, possuem elevado aumento relativo, quando comparados os períodos de pré e pós falta. O espectro acima de 2 kHz, gerado pelo centelhamento, também pode ser utilizado.

A TW se mostrou versátil na observação das FAI, uma vez que mais de um nível de decomposição e wavelet mãe podem ser utilizados.

A revisão aponta que a observação dos componentes harmônicos de ordem par e ímpar do espectro de baixa frequência são bons indicadores de falta. Destes, os mais significativos são os de 2º a 6º ordem, sendo os de ordem ímpar predominantes.

O espectro inter-harmônico localizado perto do componente fundamental, além de bom indicador de falta de alta impedância é um classificador natural, que pode ajudar a distinguir as FAI de outros eventos comuns ao sistema.

Ainda, presente nas características, o valor da assimetria na corrente, tanto em um mesmo ciclo, quanto em ciclos subsequentes se mostrou um indicador confiável deste tipo de evento.

Em consequência deste estudo, a detecção do evento estudado deve ser baseado não apenas em uma, mas em um conjunto destas características, de modo a estabelecer um critério confiável de identificação e natural exclusão de outros eventos.

5 Modelo Computacional de Falta de Alta Impedância Proposto

Como apresentado no capítulo 3, os modelos de FAI mais simples, baseados em diodos, não são capazes de reproduzir as características aleatórias da corrente de falta e os modelos que apresentam algum tipo de controle ainda são determinísticos. A proposta do modelo desenvolvido neste trabalho é ser capaz de reproduzir as principais características das FAI apresentadas no capítulo 2 e ainda introduzir características aleatórias e certo nível de controle de parâmetros.

A utilização deste modelo tem por fim servir como base para o aprimoramento de métodos de detecção e localização de FAI, assim como de suas características. Este capítulo apresenta o modelo de falta de alta impedância proposto neste trabalho e discorre sobre seus detalhes de funcionamento e utilização.

5.1 O Modelo Proposto

O modelo foi desenvolvido no programa ATPDraw, interface gráfica do ATP, que além dos componentes padrão, permite ao usuário o desenvolvimento de blocos programáveis por meio da linguagem MODELS em conjunto com blocos TACS. Como base, foi utilizada uma modificação do modelo de Emanuel [64], apresentado em 3.1.2, no qual a impedância série foi substituída por uma resistência controlada. Esta resistência está conectada em série com dois diodos em anti-paralelo, cada um em série com uma fonte de tensão contínua. Estas fontes possuem polaridades opostas: V_p é positiva em relação à massa e V_n negativa. Duas chaves, uma conectada em série com o alimentador e à jusante do modelo (CH1), outra em derivação no ponto de falta (CH2) são responsáveis pela simulação do rompimento do condutor e posterior toque no solo, respectivamente. A Figura 35 exibe esta configuração.

Figura 35 - Modelo de FAI: Elementos Controlados.

Esta configuração representa os elementos controlados. O modelo reproduz as características da falta de alta impedância por meio do controle das duas chaves e da resistência. Para fazer este controle foram desenvolvidos oito blocos, programados em linguagem MODELS, os quais serão explicados em detalhes na sequência desta seção. As palavras bloco e MODELS serão usadas como sinônimos ao longo do texto. A referência a um MODEL específico poderá ser feita utilizando o nome a ele atribuído.

5.1.1 MODEL control

Este bloco possui 18 saídas e nenhuma entrada. Ele faz o papel da interface com o usuário, por meio da qual é feita a parametrização do modelo. A Figura 36 exibe o bloco com suas saídas.

Figura 36 - MODEL control.

Ao abrir este bloco o usuário encontra a interface exibida na Figura 37. Como os 18 parâmetros não podem ser exibidos em apenas uma tela, descendo a barra de rolagem, o restante dos parâmetros é apresentado em sequência na Figura 38 e Figura 39.

MODEL: CONTROL

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
vl		25000
freq		60
vp		5000
tromp		0.2
ttoque		2
ifalta		15
cbup		10
solo		2

NODE	PHASE	NAME
vl	1	vl
freq	1	freq
vp	1	vp
tromp	1	tromp
ttoque	1	ttoque
ifalta	1	ifalta
cbup	1	cbup
solo	1	solo

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Models Library

Model: CONTROL Edit Use As: DEFAULT Record

☐ Hide ☐ Protect

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 37 - Interface MODEL control – Parâmetros 1.

MODEL: CONTROL

Attributes

DATA	UNIT	VALUE
solo		2
z1r2		20
z2r2		60
pz1r2		50
pz2r2		2
z1r3		25
z2r3		25
pz1r3		20

NODE	PHASE	NAME
vl	1	vl
freq	1	freq
vp	1	vp
tromp	1	tromp
ttoque	1	ttoque
ifalta	1	ifalta
cbup	1	cbup
solo	1	solo

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Models Library

Model: CONTROL Edit Use As: DEFAULT Record

☐ Hide ☐ Protect

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 38 - Interface MODEL control - Parâmetros 2.

DATA	UNIT	VALUE
pz1r2		50
pz2r2		2
z1r3		25
z2r3		25
pz1r3		20
pz2r3		20
mincic		4
maxcic		10

NODE	PHASE	NAME
vl	1	vl
freq	1	freq
vp	1	vp
tromp	1	tromp
ttoque	1	ttoque
ifalta	1	ifalta
cbup	1	cbup
solo	1	solo

Order: 0 Label:

Comment:

Model: CONTROL Edit Use As: DEFAULT Record

Hide Protect

Edit definitions OK Cancel Help

Figura 39 - Interface MODEL control - Parâmetros 3.

De início o usuário deve inserir o valor da tensão de linha vl em volts e da frequência $freq$ em hertz referentes aos valores nominais do alimentador no qual o modelo está inserido. Estes valores são utilizados nos cálculos de corrente de falta e resistências, como será visto na explicação dos blocos relacionados a estes cálculos. O parâmetro $tromp$ é o tempo no qual o cabo se romperá, em segundos. Este parâmetro controla a abertura da chave CH1, em série com o alimentador. O parâmetro $ttoque$ é o tempo no qual o cabo tocará o solo, em segundos. Portanto, o tempo de queda do condutor será dado por:

$$tqueda = ttoque - tromp [s]. \quad (26)$$

Os outros parâmetros de control serão explicados em seus contextos, nos quais os detalhes serão elucidados. Por hora, segue uma breve descrição, na ordem que aparecem no bloco:

- vp – Valor de tensão da fonte CC de polaridade positiva.
- $ifalta$ – Amplitude máxima da corrente de falta, considerando nulos os parâmetros $z1r2$, $z2r2$, $z1r3$ e $z2r3$.

- *cbup* – Número de ciclos de *buildup*, ou seja, número de ciclos até que a resistência $r1$ atinja o valor estipulado pela variável *erro* do bloco *r1*.
- *solo* – Tipo de solo no qual ocorre a falta: úmido, seco ou arenoso, escolhidos pelos valores 0, 1 e 2, respectivamente.
- $z1r2$ – Porcentagem máxima de redução da resistência fixa da zona 0 ($r2z0fx$) em $r2$. Utilizada para o cálculo da resistência fixa da zona 1 ($r2z1fx$).
- $z2r2$ – Porcentagem máxima de redução da resistência fixa da zona 0 ($r2z0fx$) em $r2$. Utilizada para o cálculo da resistência fixa da zona 2 ($r2z2fx$).
- $pz1r2$ – Probabilidade da resistência $r2$ assumir um valor de resistência pertencente à zona 1.
- $pz2r2$ – Probabilidade da resistência $r2$ assumir um valor de resistência pertencente à zona 2.
- $z1r3$ – Porcentagem máxima de redução da resistência fixa da zona 0 ($r3z0fx$) em $r3$. Utilizada para o cálculo da resistência fixa da zona 1 ($r3z1fx$).
- $z2r3$ – Porcentagem máxima de elevação da resistência fixa da zona 0 ($r3z0fx$) em $r3$. Utilizada para o cálculo da resistência fixa da zona 2 ($r3z2fx$).
- $pz1r3$ – Probabilidade da resistência $r3$ assumir um valor de resistência pertencente à zona 1.
- $pz2r3$ – Probabilidade da resistência $r3$ assumir um valor de resistência pertencente à zona 2.
- *mincic* – Número mínimo de ciclos no qual o valor da resistência $r3$ persistirá antes de trocar de zona.
- *maxcic* – Número máximo de ciclos no qual o valor da resistência $r3$ persistirá antes de trocar de zona.

5.1.2 MODEL qdte

Visto na Figura 40, o bloco *qdte*, o qual também será chamado de bloco de sincronização ao longo deste texto, pois sincroniza o comportamento das resistências e da CH2 com a tensão no ponto de falta, possui duas saídas e uma entrada, que recebe o valor

instantâneo da tensão no ponto de falta. As saídas são nomeadas ciclo e semcic e a entrada, vfalta. Este bloco é responsável por informar ao modelo o momento no qual ocorre um ciclo e um semiciclo da tensão lida no ponto de falta.

Figura 40 - MODEL qdte.

O bloco qdte funciona do seguinte modo: lê a tensão de entrada, descartando os dois primeiros ciclos de simulação para evitar transitórios. No ciclo que segue, baseado na mudança de polaridade do sinal de tensão, mede o tempo de duração de uma senoide completa. Com base neste tempo, a cada múltiplo inteiro, marca um ciclo e a cada metade, um semiciclo. O resultado da detecção de ciclo e resultado da detecção de semiciclo se veem na Figura 41 e Figura 42 respectivamente.

Figura 41 - Detecção de Ciclo.

Figura 42 - Detecção de Semiciclo.

O fluxograma da Figura 43 resume o funcionamento do bloco de sincronismo, como explicado.

Figura 43 - Fluxograma do MODEL qdte.

5.1.3 MODEL start

Este bloco, visto na Figura 44, é responsável por indicar ao modelo o momento em que o cabo é rompido e o momento em que toca o solo. Suas 3 entradas são alimentadas pelas saídas dos blocos control e qdte, já explicados.

Figura 44 - Bloco MODEL start.

As variáveis de saída: *rompe* e *toca*, assumem nível alto nos instantes de rompimento do condutor e posterior toque no solo, respectivamente. Estes valores, medidos em segundos, são escolhidos pelo usuário no bloco de interface, nas variáveis *tromp* e *ttoque*, as quais são duas das 3 entradas de *start*. A terceira entrada é a variável *ciclo*, a qual é saída do bloco de sincronismo, o qdte. O modelo foi desenvolvido de modo que a tensão e a corrente no ponto de falta estejam em fase, como apresentado pela literatura [69]. Por este motivo, o *MODEL start* pode colocar a saída *toca* em nível alto em *ttoque* segundos, caso este tempo seja coincidente com o início de um ciclo, ou, caso isso não ocorra, o bloco espera a ocorrência de um ciclo para colocar a saída *toca* em nível alto.

A fim de exemplificar o comportamento deste bloco, a Figura 45 mostra a simulação do rompimento de um condutor em 0,01 s (*tromp*). Vê-se que o tempo de rompimento obedeceu ao tempo estabelecido (0,01 s). A Figura 46 mostra a simulação do tempo de toque em 0,03 s (*ttoque*). Nota-se que o toque ocorre em 0,033 s, ou seja, no segundo ciclo, sincronizado com o contador de ciclos. Nesta figura, a amplitude da variável *ciclo* foi multiplicada por 2, para facilitar a distinção da variável *toca* no momento do toque.

Figura 45 - Indicação de Rompimento do Cabo.

Figura 46 - Indicação de Toque no Solo.

O fluxograma da Figura 47 resume o comportamento deste MODEL.

Figura 47 - Fluxograma do MODEL start.

5.1.4 MODEL tarç

O MODEL tarç é responsável por informar ao modelo os tempos de intermitência da corrente de falta, ou seja, o tempo em ciclos no qual o arco irá existir (*con*) e o tempo em ciclos entre a ignição de dois sucessivos arcos (*coff*). Este bloco segue as probabilidades de existência e inexistência de arco elétrico de medidas reais apresentadas em [1] como uma porcentagem total do número de eventos medidos e separadas por tipo de solo: molhado, seco e arenoso. Estas probabilidades estão listadas no Anexo I.

A referência apresenta o número de ciclos *on* e *off* separados por tipo de solo e como uma porcentagem do valor total de eventos. Assim, no MODEL tarç, uma variável

aleatória (*rand*) assume valores de 0 a 100 para cada tipo de solo, representando a totalidade de eventos (100 %). Esta faixa de valores é dividida de acordo com o valor de cada porcentagem, de modo que a soma destas totalize 100 %. Como exemplo, se em solo molhado houvesse apenas a probabilidade de ocorrerem arcos de 2 ou 3 ciclos, e, nas medidas fosse constatado que 35% dos eventos eram arcos de 2 ciclos e 65% eram arcos de 3 ciclos, caso a variável *rand* fosse menor que 35, a variável *con* assumiria o valor de 2 (ciclos), caso fosse maior que 35 e menor ou igual a 100, *con* receberia o valor 3.

A Figura 48 exibe o bloco *tarc*, que recebe da interface control o tipo do solo (variável *solo*) no qual a simulação da falta ocorrerá e do bloco *switch*, que será estudado, um pulso de requisição (variável *req*), que, quando em nível alto (valor unitário) faz com que o MODEL *tarc* altere em suas saídas o valor de *con* e *coff*, representando o fenômeno de intermitência do arco, ou seja, o tempo em que ele existirá e o tempo durante o qual ficará extinto. Em suas saídas, a cada pulso de *req* e, dependendo do solo escolhido, *con* e *coff* assumem valores inteiros que indicam o número de ciclos no qual o arco deverá existir e o intervalo até a ignição do próximo arco.

Figura 48 - MODEL *tarc*.

A Figura 49 mostra o funcionamento do bloco. O sinal de requisição (*req*) pulsa na entrada. A cada pulso as saídas *con* e *coff* têm seus valores alterados. A simulação foi feita para *solo* possuindo valor unitário, simulando solo seco.

Figura 49 - Funcionamento do MODEL tarç.

Como complemento, a Figura 50 exibe o fluxograma do funcionamento deste bloco.

Figura 50 - Fluxograma do MODEL tarç.

5.1.5 MODEL switch

Este MODEL, visto na Figura 51, comanda diretamente as chaves CH1 e CH2. É ele que fornece o sinal de abertura e fechamento de ambas. Este bloco recebe em suas entradas o instante em que o cabo se rompe, pela variável *rompe*, o instante que o cabo tocará o solo pela variável *toca*, as quais são saídas do MODEL start. Recebe ainda a referência *ciclo*, vinda de *qdte* e o número de ciclos de existência de arco (*con*) e de inexistência (*coff*), vindas de *tarc*.

Figura 51 - MODEL switch.

As saídas que controlam as chaves são CH1 e CH2, que em nível lógico alto as fecham e em nível lógico baixo as abrem. A saída *req* é passada para o MODEL *tarc* que, como já explicado, retorna *con* e *coff* a cada pulso da mesma.

Para ilustrar o comportamento do bloco, foi simulado um rompimento de condutor em 0,01 s (*tromp*) e posterior toque no solo em 0,025 s (*ttoque*). A Figura 52 mostra que CH1, que estava fechada, tem seu valor alterado para zero no instante em que a variável *rompe* assume nível alto. Desse modo, assim que o cabo se rompe CH1 é aberta. A Figura 53 mostra o momento do toque. Vê-se que CH2 fecha ao mesmo tempo em que a variável *toca* indica o toque no solo. Como explicado em 5.1.3, o bloco MODEL start sincroniza o início da falta com o início de um ciclo, deste modo, mesmo tendo sido escolhido o instante 0,025 s para o toque, este ocorre em 0,02917 s. Vale ressaltar que este tempo não é um múltiplo do período fundamental, pois a tensão de referência não inicia com ângulo de fase nulo.

Figura 52 - Rompimento do Condutor e Abertura de CH1.

Figura 53 - Toque do Condutor no Solo e Fechamento de CH2.

Para deixar ainda mais claro, a Figura 54 mostra um exemplo da ocorrência de uma FAI, lida no ponto de falta, e o estado das duas chaves e do pulso de requisição, ambos escalados para melhor visualização.

Figura 54 - Funcionamento do MODEL switch.

Nota-se que sempre existe um pulso de requisição no início do fechamento de CH2, o qual vai ditar o tempo de existência do arco (CH2 fechada). Ao fim deste tempo, CH2 é aberta, um novo pulso requisita o tempo durante o qual não ocorrerá o arco (corrente nula). Ao fim deste tempo, um novo pulso requisita o tempo de ignição do próximo arco, que controlará o tempo em que CH2 ficará fechada, e assim sucessivamente. A CH1 é aberta pouco depois do início da simulação, permanecendo neste estado até que seja executado outro caso de FAI.

A Figura 55 exibe o fluxograma deste MODEL. Como explicado, o rompimento do cabo ocorre quando o tempo de simulação atinge o tempo estipulado pela variável *tromp*, que culmina na abertura da chave CH1. Caso o cabo tenha tocado o solo, a CH2 será fechada, dando início a falta. Neste instante é necessário saber quantos ciclos de existência terá o arco e quantos ciclos o modelo deve esperar para a ignição do próximo arco. Isso é feito pela requisição de *con* e *coff* para o MODEL *tarc*, por meio de um pulso na variável *req*. De posse destes tempos o MODEL switch observa se ocorreu ciclo, incrementando um contador de ciclos que, quando atinge o valor de *con*, abre CH2 para extinguir o arco e zera o contador para que possa reiniciar nova contagem no próximo arco. Com o arco extinto, o contador de ciclos volta a ser incrementado a cada ciclo. Quando o contador atinge o valor de *coff*, fecha CH2 para dar início a um novo arco, cuja extinção será feita pelo valor de *con* e assim sucessivamente, de modo que a cada requisição, os valores de *con* e *coff* sejam diferentes, respeitem as probabilidades programadas e, portanto, reproduzam as características de intermitência da corrente de FAI.

Figura 55 - Fluxograma do MODEL switch.

5.1.6 MODEL r1

Responsável por conferir à corrente de falta a característica de *buildup*, este bloco, mostrado na Figura 56, compõe uma das três parcelas que somadas totalizam o valor da resistência controlada. A cada ignição do arco esta resistência inicia com valor máximo e tem seu valor reduzido a cada ciclo. O tempo de decaimento é calculado para que, no ciclo parametrizado em *cbup*, seu valor atinja uma porcentagem do valor inicial de *r1*, estipulado pela variável *erro*. A equação (27) mostra como é calculado o valor de *r1*.

Figura 56 - MODEL r1.

$$r1 = A e^{-bt} [\Omega] \quad (27)$$

Sendo:

- A – Amplitude da exponencial, em ohms.
- b – Coeficiente de crescimento.
- t – Instante de tempo no qual *r1* será calculado, em segundos.

O valor do coeficiente de crescimento é dado pela equação (28).

$$b = \frac{-\ln\left(\frac{\text{erro}}{A}\right) \text{freq}}{\text{cbup}} \quad (28)$$

Sendo:

- *erro* – Porcentagem de A , na qual se considera que a exponencial atingiu o valor final.

- $cbup$ – Número de ciclos de *buildup* escolhido pelo usuário.
- $freq$ – Frequência do sistema, em Hz.

A Figura 57 ilustra o comportamento de $r1$ para a seguinte configuração:

- $cbup = 10$ ciclos.
- $erro = 1\%$ do valor de A .
- $A = 1000 \Omega$.

Nesta figura a variável ciclo teve sua amplitude multiplicada por 100 para que pudesse ser melhor visualizada. Nota-se que na décima contagem da variável ciclo, $r1$ possui valor 10 ohms, respeitando a porcentagem estabelecida pela variável $erro$.

Figura 57 - Exemplo de Comportamento de $r1$.

A Figura 58 mostra o fluxograma do funcionamento do MODEL $r1$. No momento em que a CH2 é fechada, se dá o início da falta, portanto, é necessário saber o valor de $r1$. Baseado nas variáveis: $cbup$, $freq$, A e $erro$, o bloco $r1$ calcula o valor de b por meio da equação (28) e o valor de $r1$ por meio da equação (27). A cada ocorrência de ciclo, indicada na entrada do bloco, a variável de tempo t , utilizada no cálculo da equação (27) é acrescida

do valor referente ao tempo de 1 ciclo. Deste modo, o valor de *r1* vai sendo atualizado a cada ciclo, respeitando o número de ciclos de *buildup* estabelecido pelo usuário.

Figura 58 - Fluxograma do MODEL r1.

5.1.7 MODEL r_2

Este bloco é responsável por conferir à corrente de falta a característica de assimetria entre os semiciclos de um mesmo ciclo. Para que esta diferença assuma valor aleatório, porém controlado, foram criadas o que se chamou de zonas de resistência. Três zonas foram criadas: zona 0, zona 1 e zona 2. A zona 0 é um valor ôhmico fixo e as zonas 1 e 2 são faixas de valores ôhmicos, contidas no interior de valores fixos, também chamados aqui de valores de borda, máximos e mínimos, dentro dos quais r_2 pode variar de forma aleatória.

O valor máximo, em ohms, que r_2 pode assumir é o valor da zona 0, também denominado de resistência fixa de zona 0, cujo valor é dado pela variável r_{2z0fx} . Como já dito, este valor é fixo e, portanto a zona 0 não é uma faixa, mas sim um valor único. As duas outras zonas são faixas de valores compreendidos entre dois limites fixos, denominados resistência fixa de zona 1 (r_{2z1fx}) e resistência fixa de zona 2 (r_{2z2fx}). Estes limites são calculados como uma redução do valor da resistência máxima (r_{2z0fx}). Com esta abordagem, o usuário poderá escolher duas faixas de valores dentro das quais r_2 poderá variar: zona 1 e zona 2, compreendidas entre os limites r_{2z1fx} e r_{2z0fx} (zona 1) e r_{2z2fx} e r_{2z1fx} (zona 2). Dentro destas faixas, a cada semiciclo, o valor de r_2 varia, modulando a assimetria de modo que a corrente fique contida pelos valores fixos de r_2 , mas varie, de modo aleatório.

A probabilidade de que r_2 assuma um valor dentro da zona 1 ou zona 2 é controlada por duas variáveis, de valor percentual: p_{z1r_2} e p_{z2r_2} , respectivamente. Portanto, as variáveis, disponíveis ao usuário na interface MODEL control, utilizadas no cálculo de r_2 são:

- $z1r_2$ – Porcentagem máxima de redução da resistência fixa da zona 0 (r_{2z0fx}) em r_2 . Utilizada para o cálculo da resistência fixa da zona 1 (r_{2z1fx}).
- $z2r_2$ – Porcentagem máxima de redução da resistência fixa da zona 0 (r_{2z0fx}) em r_2 . Utilizada para o cálculo da resistência fixa da zona 2 (r_{2z2fx}).
- p_{z1r_2} – Probabilidade da resistência r_2 assumir um valor de resistência pertencente à zona 1.
- p_{z2r_2} – Probabilidade da resistência r_2 assumir um valor de resistência pertencente à zona 2.

Os valores de borda, fixos, são calculados pelo modelo de acordo com: a corrente parametrizada na variável *ifalta*, o valor da tensão de linha do alimentador e o valor da fonte *vp* do modelo. Uma vez parametrizadas as variáveis que controlam *r2*, estes valores são passados ao MODEL *r2*, exibido na Figura 59, junto com as variáveis: *vl*, *vp*, *semcic*, *CH2* e *ifalta*. A saída do bloco é o valor de *r2*.

Figura 59 - MODEL *r2*.

Dentro do bloco, os primeiros cálculos são feitos para estabelecer os valores de borda, ou valores fixos das zonas, dentro dos quais *r2* poderá variar. A equação (29) mostra o cálculo de *r2z0fx*, que é o valor de borda (fixo) da resistência *r2* na zona 0, lembrando, o maior valor que *r2* poderá assumir.

$$r2z0fx = \frac{\left(\left(vl \cdot \sqrt{2/3} \right) - vp \right)}{2 \cdot ifalta} [\Omega] \quad (29)$$

Esta equação mostra que, na zona 0, *r2* assume a metade do valor necessário para que a corrente de falta atinja a amplitude *ifalta* estabelecida pelo usuário. A outra metade deste valor em zona 0 será atribuído à resistência *r3*. Os valores de resistência de borda

das zonas 1 e 2, que, como explicado, são calculados como uma redução do valor máximo de $r2(r2z0fx)$, são dados pela equação (30) e equação (31), respectivamente.

$$r2z1fx = r2z0fx - (r2z0fx \cdot z1r2 / 100) [\Omega] \quad (30)$$

$$r2z2fx = r2z0fx - (r2z0fx \cdot z2r2 / 100) [\Omega] \quad (31)$$

Assim, a zona 0 sempre assumirá o maior valor dentre as três regiões, seguida pela zona 1 e então 2. A redução percentual do valor da zona 0 é especificada pelas variáveis $z1r2$ e $z2r2$, que estão disponíveis ao usuário. A Figura 60 mostra um exemplo de como se configuram as zonas. Os valores foram calculados considerando $vL=25$ kV, $vP=5$ kV, $z1r2=20\%$, $z2r2=60\%$ e $ifalta=20$ A.

Figura 60 - Exemplo de Cálculo de zonas de $r2$.

Representada na Figura 60, a zona 0 é o valor do traço em vermelho. A zona 1 está compreendida entre o valor da zona 0 (em vermelho) e o valor de borda da zona 1, representado em preto. A zona 2 está compreendida entre o valor de borda da zona 1 (preto) e o valor de borda da zona 2 (azul). Dentro destas zonas, a resistência $r2$ varia seu valor a cada semiciclo. A probabilidade de que $r2$ assuma valores em cada uma das zonas é especificado pelas variáveis $pz1r2$ e $pz2r2$.

No MODEL $r2$ uma variável aleatória (rand) assume valores de 0 a 1. Com o valor desta variável a zona é escolhida de acordo com as probabilidades parametrizadas pelo usuário. Deste modo, a probabilidade que $r2$ assumo o valor em uma ou outra zona, segue o seguinte critério :

- Zona 0 se $\text{rand} \geq 0$ e $\text{rand} \leq 1 - (\frac{pz1r2 + pz2r2}{100})$.
- Zona 1 se $\text{rand} > 1 - (\frac{pz1r2 + pz2r2}{100})$ e $\text{rand} \leq 1 - (\frac{pz2r2}{100})$.
- Zona 2 se $\text{rand} > 1 - (\frac{pz2r2}{100})$ e $\text{rand} \leq 1$.

A Figura 61 exemplifica, com novos parâmetros, como o valor de $r2$ varia a cada marcação de semiciclo, respeitando os limites impostos pelas zonas. Neste caso os valores de $pz1r2$ e $pz2r2$ são 50% e 1% de probabilidade de ocorrência destas zonas. Em decorrência disso, a probabilidade de ocorrência da zona 0 é de 49%. A amplitude da variável ciclo foi multiplicada por 100 para melhor visualização.

Figura 61 - Comportamento de $r2$.

A Figura 62 mostra o fluxograma do funcionamento do bloco MODEL r2. No momento em que a CH2 é fechada, a falta é iniciada. São então calculados os valores de borda das zonas: $r2z0fx$, $r2z1fx$ e $r2z2fx$. A cada ocorrência de semiciclo, por meio do valor aleatório gerado pela variável $rand$, uma zona é escolhida, de acordo com a lógica apresentada nesta seção e as probabilidades $pz1r2$ e $pz2r2$, parametrizadas pelo usuário. Sendo escolhida a zona, $r2$ assumirá um valor, também aleatório, respeitando os limites da zona em questão.

Caso a zona escolhida seja a zona 0, que possui valor fixo, $r2$ assumirá o valor de $r2z0fx$. Caso a zona escolhida seja a zona 1, $r2$ assumirá um valor aleatório, inserido entre os valores fixos: $r2z0fx$ e $r2z1fx$, de acordo com a equação (32). Caso a zona escolhida seja a zona 2, $r2$ assumirá um valor aleatório, inserido entre os valores fixos: $r2z1fx$ e $r2z2fx$, de acordo com a equação (33).

$$r2 = r2z0fx - rand \cdot (r2z0fx - r2z1fx)[\Omega] \quad (32)$$

$$r2 = r2z1fx - rand \cdot (r2z1fx - r2z2fx)[\Omega] \quad (33)$$

No momento em que a CH2 for aberta, significa que o arco foi extinto, portanto $r2$ assume valor nulo.

Figura 62 - Fluxograma do MODEL r2.

5.1.8 MODEL r3

A resistência $r3$ funciona de maneira semelhante à resistência $r2$. Neste bloco, porém, o objetivo é conferir à corrente de falta a característica de variação da resistência do arco, que ocorre ao longo do tempo, a exemplo do sinal mostrado na Figura 9, entre 2,5 e 4 segundos, na qual a amplitude aumenta e diminui com o passar do tempo.

Assim como em $r2$, três zonas foram criadas. Desta vez, ao invés de duas zonas de redução do valor ôhmico, a zona 0 tem seu valor fixo estabelecido entre as zonas 1 e 2, sendo a zona 1 uma zona de redução de resistência e a zona 2 uma zona de elevação de resistência. Em complemento ao valor da zona 0, assumido por $r2$, a zona 0 de $r3$ terá valor igual à metade do valor necessário para que a corrente de falta atinja a amplitude de $ifalta$, especificada pelo usuário. Deste modo, a soma dos valores de zona 0 de $r2$ e $r3$ fazem com que a amplitude da corrente de falta, após cessado o *buildup*, atinja o valor $ifalta$.

Os valores de borda das zonas 0, 1 e 2 da resistência $r3$ são calculados pelas equações (31), (32) e (33).

$$r3z0fx = \frac{\left((vl \cdot \sqrt{2/3}) - vp \right)}{2 \cdot ifalta} [\Omega] \quad (31)$$

$$r3z1fx = r3z0fx - (r3z0fx \cdot z1r3 / 100) [\Omega] \quad (32)$$

$$r3z2fx = r3z0fx + (r3z0fx \cdot z2r3 / 100) [\Omega] \quad (33)$$

A Figura 63 mostra um exemplo de como se configuram as zonas visualmente. Os valores foram calculados considerando $vl=25$ kV, $vp=5$ kV, $z1r3=30$, $z2r3=30$ e $ifalta=20$ A.

Figura 63 - Exemplo de Cálculo de Zonas de r3.

Representada na Figura 63, a zona 0 ($r3z0fx$) é o valor do traço em vermelho. A zona 1 está compreendida entre o valor da zona 0 (em vermelho) e o valor de borda da zona 1 ($r3z1fx$), representado em preto. Esta é a zona de redução. A zona 2 está compreendida entre o valor de borda da zona 0 ($r3z0fx$) e o valor de borda da zona 2 ($r3z2fx$), em azul. Dentro destas zonas, a resistência $r3$ pode variar seu valor. A probabilidade de que $r3$ assuma valores em cada uma das zonas é especificado, em porcentagem, pelas variáveis $pz1r3$ e $pz2r3$, disponíveis ao usuário no bloco control. Assim como no MODEL r2, no MODEL r3, a escolha das zonas é feita por meio de uma variável aleatória (rand), que assume valores entre 0 e 1. Com o valor desta variável a zona é escolhida de acordo com o critério igual ao do MODEL r2:

- Zona 0 se $\text{rand} \geq 0$ e $\text{rand} \leq 1 - \left(\frac{pz1r3 + pz2r3}{100}\right)$.
- Zona 1 se $\text{rand} > 1 - \left(\frac{pz1r3 + pz2r3}{100}\right)$ e $\text{rand} \leq 1 - \left(\frac{pz2r3}{100}\right)$.
- Zona 2 se $\text{rand} > 1 - \left(\frac{pz2r3}{100}\right)$ e $\text{rand} \leq 1$.

calculados os valores de borda das zonas: $r3z0fx$, $r3z1fx$ e $r3z2fx$. A cada ocorrência de ciclo, por meio do valor aleatório gerado pela variável $rand$, uma zona é escolhida, de acordo as probabilidades $pz1r3$ e $pz2r3$, parametrizadas pelo usuário. Sendo escolhida a zona, $r3$ assumirá um valor, também aleatório, respeitando os limites da zona em questão.

Caso a zona escolhida seja a zona 0, que possui valor fixo, $r3$ assumirá o valor de $r3z0fx$. Caso a zona escolhida seja a zona 1, $r3$ assumirá um valor aleatório, inserido entre os valores fixos: $r3z0fx$ e $r3z1fx$, de acordo com a equação (35). Caso a zona escolhida seja a zona 2, $r3$ assumirá um valor aleatório, inserido entre os valores fixos: $r3z0fx$ e $r3z2fx$, de acordo com a equação (36).

$$r3 = r3z0fx - rand \cdot (r3z0fx - r3z1fx)[\Omega] \quad (35)$$

$$r3 = r3z0fx + rand \cdot (r3z2fx - r3z0fx)[\Omega] \quad (36)$$

Este valor de $r3$ deverá ser mantido durante o valor estabelecido pela variável $ciclos$, dada pela equação (34). Para isso, a cada ocorrência de ciclo, um contador de ciclos de patamar (chamado de patamar pois o valor de $r3$ se mantém constante) é incrementado e comparado com a variável $ciclos$. Caso o número de ciclos de patamar for atingido, há uma nova escolha de número de ciclos, zona e assim sucessivamente. No momento em que a CH2 for aberta, significa que o arco foi extinto, portanto $r3$ assume valor nulo.

Figura 65 - Fluxograma do MODEL r3.

5.1.9 Relação entre as Variáveis dos Blocos

Para facilitar o entendimento das relações entre as variáveis de entrada e saída dos blocos do modelo proposto, a Figura 66 e a Figura 67 mostram os fluxogramas de cada bloco. As entradas e saídas foram coloridas de modo que as cores iguais indicam variáveis provenientes do mesmo modelo.

Figura 66 - Fluxograma de Relação das Variáveis do Modelo de Falta (parte1).

Figura 67 - Fluxograma de Relação das Variáveis do Modelo de Falta (parte2).

5.2 Resultados do Modelo: Reprodução de Características de Falas da Alta Impedância

Para exemplificar e esclarecer o funcionamento do modelo, as características de FAI que ele é capaz de reproduzir e como o usuário pode configurar a interface, esta seção apresenta o resultado de simulações com diferentes configurações do MODEL control. A cada exemplo será dada a configuração da interface, o resultado gráfico e, em seguida, este resultado será comentado e comparado visualmente a sinais de faltas reais apresentados na literatura.

Devido ao interesse desta seção ser a demonstração das características do modelo e não sua interação com algum sistema, o modelo foi inserido em um sistema simples, não real, com um gerador monofásico, representando uma das fases de um sistema trifásico de 25 kV e 60 Hz. Foram inseridos dois resistores em derivação, à montante e à jusante do ponto de falta, no valor de $700\ \Omega$, como mostra a Figura 68.

Figura 68 - Modelo em Sistema Não Real.

Para todos os casos, as variáveis não apresentadas possuem valor nulo e são comuns as seguintes configurações da interface:

- $v_l = 25\text{ kV}$. Valor da tensão de linha na subestação.
- $freq = 60\text{ Hz}$. Frequência do sistema.

- $vp = 5$ kV. Valor de tensão de ignição de arco, baseado em [5],[43].
- $tromp = 0,1$ s. Tempo de rompimento do condutor, escolhido de modo a estar a poucos ciclos do início de simulação para facilitar a visualização gráfica e ser tempo suficiente para eliminar transitórios iniciais.
- $ttoque = 0,2$ s. Não respeita o tempo real de queda. Foi escolhido para que a visualização da oscilografia não apresente muitos ciclos.
- $ifalta = 15$ A. Valor de corrente para areia molhada, exibido na Tabela 3.
- $solo = 2$. Solo arenoso.

5.2.1 Caso 1: FAI sem *Buildup*

No caso 1, as resistências $r2$ e $r3$, que simulam assimetria e variação da resistência do arco ao longo do tempo têm seus parâmetros nulos. O número de ciclos de *buildup* também é nulo.

- $cbup = 0$ ciclos.
- $z1r2 = 0$ %.
- $z2r2 = 0$ %.
- $pz1r2 = 0$ %.
- $pz2r2 = 0$ %.
- $z1r3 = 0$ %.
- $z2r3 = 0$ %.
- $mincic = 0$ ciclos.
- $maxcic = 0$ ciclos.

A Figura 69 mostra o resultado da simulação com os parâmetros descritos. A Figura 70 mostra uma aproximação para que fique mais visível a oscilografia da corrente de falta.

Figura 69 - Caso 1.

Figura 70 - Caso 1 - Aproximação.

O intuito desta simulação é mostrar que o modelo pode ser utilizado para reproduzir os modelos de diodos mais simples, como o apresentado em 3.1.2, com a vantagem de apresentar o tempo de intermitência do arco e possibilitar ao usuário a escolha da amplitude da corrente, sem a necessidade de fazer cálculos. No caso apresentado, como

esperado, a amplitude é de 15 A, não existe nenhum tipo de assimetria, modulação, *buildup* ou *shoulder*. O sinal resultante se assemelha ao sinal real mostrado na Figura 71, uma reprodução da Figura 19.

Figura 71 - Corrente de FAI. *Fonte:* [55].

5.2.2 Caso 2: FAI com *Buildup*

O segundo caso foi parametrizado do mesmo modo que o primeiro, modificando apenas a variável *cbup*, que assume valor de 10 ciclos. A Figura 72 mostra o resultado da simulação.

Figura 72 - Caso 2.

Como programado, em 10 ciclos a corrente de falta atinge o valor de *ifalta* que, no caso, é de 15 A. Esta simulação mostra a capacidade do modelo, não apenas de gerar, mas de controlar as características de *buildup* da corrente de falta. Este caso se assemelha às características da corrente de falta real mostradas na Figura 73, uma reprodução da Figura 6. A amplitude do sinal simulado difere da apresentada na Figura 73 para que se mantenha coerência com o sistema simulado e a corrente de falta não ultrapasse a corrente de carga. Para esclarecimento, é possível com o modelo proposto escolher uma corrente da amplitude apresentada (aproximadamente 90 A).

Figura 73 - Corrente de falta em cascalho fino. *Fonte:* [10].

5.2.3 Caso 3: FAI com *Buildup* e Assimetria

A Figura 74 exibe o resultado desta simulação do terceiro caso, que mantém as configurações do segundo caso e modifica os seguintes valores referentes à resistência r_2 e ciclos de *buildup*:

- $cbup = 20$ ciclos.
- $z1r2 = 25$ %.
- $pz1r2 = 50$ %.

Figura 74 - Caso 3.

Este caso ilustra que é possível utilizar o modelo para gerar modulações produzidas pela mudança de assimetria entre semiciclos ao longo do tempo. Como comparação, a Figura 75 mostra um sinal de FAI real, retirado de [70].

Figura 75 - Sinal de Corrente de FAI real . *Adaptado de:* [70]

5.2.4 Caso 4: FAI com *Buildup*, Assimetria e Modulações

Para o quarto caso, as variáveis assumem os seguintes valores:

- $cbup = 10$ ciclos.
- $z1r2 = 25$ %.
- $z2r2 = 10$ %.
- $pz1r2 = 50$ %.
- $pz2r2 = 30$ %.
- $z1r3 = 40$ %.
- $z2r3 = 40$ %.
- $pz1r3 = 30$ %.
- $pz2r3 = 30$ %.
- $mincic = 8$ ciclos.
- $maxcic = 15$ ciclos.

A Figura 76 mostra o resultado da simulação. Com este caso é demonstrada, além da assimetria, a variação de resistência do arco, que pode ser percebida pela redução e aumento da amplitude da corrente de falta ao longo do tempo. Este comportamento foi visto na seção 2.1.3, na Figura 9, entre 2,2 (aproximadamente) e 4 segundos, agora mostrado na Figura 77.

Figura 76 - Caso 4.

Figura 77 - Corrente instantânea de uma FAI. Fonte: [44].

5.3 Considerações Finais Sobre o Capítulo

Neste capítulo a reprodução pelo modelo proposto das características de falta foi estudada de modo prático, sendo este inserido em um sistema não real, para que as estas características pudessem ser isoladas, não sofrendo influências passíveis de ocorrer em um sistema real. Para tanto, ainda neste sistema, a medição foi feita após o resistor à montante do ponto de aplicação da falta, de modo que a corrente de carga não fosse adicionada à corrente de falta e impossibilitasse a comparação visual com os sinais de falta reais, já que estes foram medidos no ponto de falta.

A comparação visual não é um método exato de extração de características, mas apresenta, de modo didático, como o modelo pode ser parametrizado para gerar correntes de falta semelhantes a sinais de medições de FAI reais.

Dos casos apresentados foi possível perceber que o modelo é capaz de gerar sinais com as mais diversas características presentes em sinais reais. Além das apresentadas, existem muitas outras opções de parametrização, o que possibilita ao usuário, a partir do conhecimento das características das FAI ou mesmo da observação de sinais reais, fazer uso do modelo para que este represente o sinal o qual deseja estudar.

6 Algoritmo para Detecção de Falta de Alta Impedância

A segunda parte da pesquisa consiste em desenvolver um algoritmo capaz de detectar faltas de alta impedância causadas pelo rompimento de um condutor da rede primária por meio da identificação das características de corrente de falta presentes na literatura, apresentadas no capítulo 2, e utilizando o modelo proposto. Este algoritmo é focado apenas na detecção de FAI, logo não foi verificada a sua imunidade em relação a outros distúrbios. Esta questão poderá ser abordada em trabalhos futuros.

Com esta abordagem do problema, além das comparações com sinais reais estudados na seção 5.2, o sucesso na detecção contribui na validação das características do sinal de falta gerado pelo modelo proposto. Esta seção descreve o comportamento do algoritmo de modo qualitativo. O sistema de distribuição utilizado assim como as equações, valores e limites de parâmetros serão discutidos na seção 6.2. Todas as funções de detecção foram desenvolvidas no programa MATLAB, versão R2015a.

6.1 Índices de Detecção e Extração de Características

A detecção da falta de alta impedância será feita com base em indicadores, ou índices de detecção (*flags*) e valores de cálculos feitos com dados do sinal de corrente da fase na qual o defeito será aplicado. Para a extração destas características o algoritmo utiliza duas janelas: uma de 1 ciclo e outra de 12 ciclos, cada uma delas possui finalidade específica. Como será apresentado nesta seção, a janela de 1 ciclo é utilizada para o cálculo do valor eficaz, assimetria e transformada de Fourier para extração harmônica. A janela de 12 ciclos é utilizada para o cálculo da transformada de Fourier para extração de componentes inter-harmônicos.

As duas janelas percorrem o sinal, em paralelo, de modo que a janela de 1 ciclo contém a mesma informação do ciclo mais atual da janela de 12 ciclos. A cada passo, as características e *flags* são calculados e atualizados. De posse destas quantidades, a lógica de detecção, que será abordada na próxima seção (6.2) decidirá se existe ou não uma FAI

ocorrendo no sistema. A Figura 78 mostra um exemplo das janelas percorrendo um sinal de corrente lido na subestação.

Figura 78 - Janela de 1 e 12 Ciclos Percorrendo o Sinal.

O algoritmo de detecção é dividido em 3 camadas. Cada camada é representada por um conjunto de algoritmos que se assemelham pela lógica apresentada. Na primeira camada são extraídas as características do sinal, na segunda os indicadores são calculados e na última camada, de posse dos indicadores, a lógica de detecção decide sobre a existência da falta. Na primeira camada, para a janela de 1 ciclo são calculados:

- Valor eficaz.
- Assimetria entre semiciclos.
- Transformada de Fourier com separação de componentes (pares e ímpares).

Para a janela de 12 ciclos são calculados:

- Transformada de Fourier com separação de componentes (pares, ímpares e inter-harmônicos).

- Índice de Existência de Componentes Inter-Harmônicos (IEIH). Calculado para as frequências entre 30 e 90 Hz, excluindo o componente fundamental.

A Figura 79 é o fluxograma do processo de extração das características da corrente.

Figura 79 - Fluxograma de Extração de Características.

A segunda camada utiliza os valores de corrente eficaz, assimetria, amplitude dos componentes harmônicos e IEIH, calculados nas janelas de 1 e 12 ciclos, para indicar as características que serão utilizadas pela lógica de detecção no momento da decisão de ocorrência da falta. Baseado no valor eficaz, calculado pela janela de 1 ciclo, duas análises são feitas: se houve redução ou se houve aumento do valor lido na janela atual em relação à passada, com atualização em passos de 1 ciclo. Dois parâmetros que ponderam percentualmente o valor de redução e de aumento do valor eficaz das janelas são

disponíveis ao usuário. Caso os valores estipulados tenham sido ultrapassados, *flags* de aumento e/ou redução são colocados em nível lógico alto (adquirem valor unitário).

A Figura 80 exibe o comportamento para a análise da redução do valor eficaz. Vê-se que, no momento do rompimento do cabo, ocorre a redução da corrente na fase analisada. Neste instante (momento indicado pela janela em vermelho) a indicação de perda de carga ocorre, indicado temporalmente no gráfico intitulado Perda de Carga, que assume valor unitário. Concomitante a isso, o *flag* de redução do valor eficaz é colocado em nível lógico 1. Este *flag* é o primeiro indicador de detecção.

Figura 80 - Indicação de Perda de Carga.

Para análise do aumento do valor eficaz, a Figura 81 mostra a janela que percorre o sinal e calcula o valor eficaz a cada ciclo. No instante mostrado, o *flag* assumiu valor unitário, pois, houve aumento do valor em relação à janela anterior, superior à porcentagem especificada. Vale comentar que nos primeiros 12 ciclos, contados do início da simulação, o valor é nulo. Esse procedimento é proposital e visa aguardar a janela de 12 ciclos estar completa com valores do sinal lido.

Figura 81 - Progressão do Valor RMS.

A assimetria, cuja expressão é:

$$assimetria = |Ap - An| [A], \quad (37)$$

é utilizada para gerar dois índices. Em (37) Ap é o valor da amplitude do semiciclo positivo da corrente de falta e An a amplitude do semiciclo negativo.

O primeiro índice é o *flag* de assimetria, que assume valor unitário quando o valor da assimetria calculada no ciclo excede o limite estabelecido pelo usuário, como uma porcentagem do maior valor entre os dois semiciclos. O segundo é o *flag* de mudança de assimetria, que indica que o valor de assimetria do ciclo anterior é diferente do ciclo atual. A Figura 82 mostra o sinal de falta sendo percorrido pela janela de um ciclo. No gráfico intitulado Assimetria vê-se o valor calculado na primeira camada do algoritmo. No instante exibido, os *flags* de assimetria e variação assumiram valor unitário já que, além de haver assimetria acima do limite parametrizado, houve variação de assimetria do ciclo anterior para o atual.

Figura 82 - Assimetria: Detecção e Variação.

Da primeira camada, a transformada de Fourier na janela de um ciclo é a base para a criação de *flags* que indicam a presença de harmônicos. Esses *flags* assumem valor unitário quando cada uma das amplitudes excede os valores estipulados no algoritmo. A Figura 83 exibe um sinal de corrente lido da subestação, a FFT da janela em vermelho e o valor dos *flags*, no caso, todos unitários, indicando a presença de componentes harmônicos acima do valor estipulado. Como já dito, valores e limites serão discutidos na seção 6.2, por hora a intenção é a compreensão qualitativa do algoritmo.

Figura 83 - *Flags* da Presença de Harmônicos.

Ainda, do mesmo modo que foi feito com a assimetria, a variação de amplitude destes harmônicos do ciclo anterior para o atual gera *flags* de variação. Os *flags* são acionados quando a diferença em módulo da amplitude dos harmônicos das duas janelas for maior que o menor dos valores de amplitude dentre estas janelas, ponderado em porcentagem, estipulado pelo usuário. A Figura 84 mostra que, no instante em que a FFT foi calculada, na janela de um ciclo, houve variação de todos os harmônicos observados em relação ao ciclo anterior, dado o limite estipulado.

Figura 84 - *Flags* da Variação de Harmônicos.

A última característica que compõe o conjunto de indicadores de falta faz uso da janela de 12 ciclos. Como já explicado, o propósito desta janela é fornecer pontos à transformada de Fourier para a extração de frequências inter-harmônicas de interesse, no caso de 30 a 90 Hz. Para a medição e detecção destes componentes foi criado um índice chamado Índice de Existência de Componentes Inter-Harmônicos (IEIH), dado por:

$$IEIH = \sqrt{\sum_{k=30}^{55} ih_k^2 + \sum_{k=65}^{90} ih_k^2} . \quad (38)$$

A ideia é baseada em [44] e visa medir a presença destes componentes no sinal. Este índice é calculado na primeira camada. O *flag* da presença dos componentes inter-harmônicos de interesse é acionado quando o valor do IEIH ultrapassa o valor especificado pelo usuário no algoritmo de detecção. A Figura 85 demonstra um sinal de falta, percorrido pela janela de 12 ciclos, em vermelho, assim como a transformada do sinal lido. Neste caso o *flag* de detecção de inter-harmônicos foi acionado.

Figura 85 - *Flag* de Inter-Harmônicos.

O fluxograma da Figura 86 mostra as condições para que os indicadores de características sejam acionados.

Figura 86 - Fluxograma de Indicadores e *Flags*.

6.2 Lógica de Detecção de Falta de Alta Impedância

Esta é a terceira e última camada do algoritmo de detecção de FAI, denominada lógica de detecção. Os *flags* previamente calculados na segunda camada são os indicadores pelos quais a lógica de detecção decidirá se existe uma falta de alta impedância ocorrendo no alimentador. Esta camada é composta por seis detectores:

- Detector de rompimento de condutor.
- Detector de *buildup*.
- Detector de arco.
- Detector de harmônicos de interesse.
- Detector de variação de harmônicos de interesse.
- Detector de falta.

6.2.1 Detector de Rompimento

O detector de rompimento de condutor utiliza a seguinte lógica: Se o *flag* de redução do valor eficaz tiver sido acionado, outro *flag* indicando um possível rompimento é colocado em nível alto. Neste momento não é dada a certeza de rompimento, pois como a análise é baseada em redução do valor eficaz da corrente, pode ter ocorrido uma perda de carga ou outro fenômeno. No instante do possível rompimento, um contador é iniciado. Caso este contador ultrapasse o valor de 1,5 segundos, que equivale ao tempo de queda do cabo (1,28 s) acrescido de uma margem para a detecção do primeiro arco, o algoritmo de detecção é reiniciado. Além do tempo máximo de detecção, foi considerado um tempo mínimo de 1 s, abaixo do qual, um aviso de detecção de falta é ignorado. Este parâmetro visa garantir a separação temporal entre o rompimento do cabo e o toque no solo. A certeza do rompimento é dada quando, tendo sido indicado o possível rompimento do condutor, um arco é detectado pelo detector de arco, que será descrito ainda nesta seção.

A lógica do detector de rompimento está apresentada na Figura 87. Quando ocorre a redução do valor eficaz, indicado pelo *flag* de redução do valor RMS, é indicado um possível rompimento. Neste momento o contador de rompimento é iniciado. É ele que marca tempo

máximo permitido para a queda do condutor (1,5 s). O algoritmo então espera a ocorrência de um arco. Enquanto o arco não é detectado, o contador de rompimento vai sendo incrementado. Se este tempo for excedido, o algoritmo de detecção de falta é reiniciado por completo e não entende-se que houve rompimento de condutor. Caso o arco seja detectado e o contador de rompimento possua tempo menor que 1,5 s o *flag* de rompimento é acionado, indicando que houve rompimento do condutor.

Figura 87 - Fluxograma do Detector de Rompimento de Condutor.

6.2.2 Detector de *Buildup*

O detector de *buildup* é acionado quando há aumento do valor eficaz, indicado pelo *flag* de aumento eficaz. A cada indicação de aumento há um incremento no contador de ciclos de *buildup*, visando indicar a existência do fenômeno de *buildup*.

6.2.3 Detector de Arco

O detector de arco, também utilizado para atestar o rompimento e toque do cabo no solo pelo detector de rompimento, é acionado quando, em simultaneidade:

- O número de ciclos em que houve aumento da corrente, indicado pelo detector de *buildup* ultrapassa o valor parametrizado no algoritmo.
- Existe assimetria entre os semiciclos.
- Existe mudança de assimetria entre 2 ciclos consecutivos.
- Existem componentes harmônicos de ordem 3 ou 5, acima dos menores valores especificados na Tabela 5: 0,83 e 0,35% do fundamental.
- O *flag* de detecção de componentes inter-harmônicos está em nível alto, indicando a presença de componentes na faixa de 30 a 55Hz e 65 a 90 Hz.

As três primeiras condições são consequência direta do acionamento dos *flags* a eles relacionados. Da literatura, apresentada na seção 4.1, foi confirmado que, quando ocorre a presença de arco, em qualquer tipo de solo, os componentes de ordem ímpar são os que apresentam maior presença no espectro de frequências. Dentre eles, o de 3ª e 5ª ordem são os mais significativos [20], [81]. Por este motivo, foram escolhidos para representar a existência do arco nesta condição do algoritmo. A Tabela 5, escolhida como referência para amplitude dos componentes harmônicos, mostra o conteúdo espectral dos componentes pares e ímpares em solo úmido e seco como porcentagem do componente fundamental em medidas reais. Foram escolhidos como indicadores de harmônicos os menores valores, equivalente a solo úmido, uma vez que, se escolhidos os maiores valores, o algoritmo de detecção poderia não detectar arcos em solos secos e arenosos.

Como a corrente de falta medida na subestação traz informação não só da corrente drenada pela falha como da corrente que alimenta as cargas à montante do ponto de falta

e a Tabela 5 traz valores como porcentagem do componente fundamental da corrente de falta, o algoritmo, ao identificar o primeiro arco, lê informação de quatro janelas anteriores à ignição do arco, identifica a corrente de carga e a subtrai da componente fundamental da TDF aplicada para poder obter a porcentagem dos componentes de interesse em relação apenas à corrente de falta. Foram escolhidos 4 ciclos para a obtenção da corrente de carga, pois, da observação de diversas simulações, o arco é detectado até o quarto ciclo, portanto, 4 ciclos anteriores à detecção do arco, apenas a corrente de carga está sendo medida na subestação.

O último indicador para a confirmação da presença de arco pelo detector de arco é o acionamento do *flag* de detecção de componentes inter-harmônicos, cujo valor parametrizado pelo usuário acima do qual o *flag* será acionado deve ser maior que o valor de IEIH, apresentado na equação (38).

Satisfeitas as condições de número de ciclos de *buildup*, presença dos componentes harmônicos e inter-harmônicos acima dos valores especificados, o arco é detectado e um contador de arcos é incrementado. Este contador será utilizado para a detecção da falta pelo detector de falta. A lógica do detector de arco é mostrada no fluxograma da Figura 88.

Figura 88 - Fluxograma da Detecção de Arco.

6.2.4 Detector de Harmônicos de Interesse

O detector de harmônicos de interesse se baseia na confirmação dos *flags* da presença de componentes harmônicos, acionado na segunda camada do algoritmo de detecção. Foi escolhido observar os harmônicos do espectro de baixa frequência, já que não são atenuadas por bancos de capacitores, ou confundidas com chaveamentos [56]. Na literatura, apresentada na seção 2.2, foi encontrado que os harmônicos ímpares são predominantes, tanto em solo seco como molhado, porém, as faltas em solo seco apresentaram conteúdo harmônico mais significativo. Em relação à amplitude, os harmônicos ímpares predominantes foram o 3º e 5º. Os pares com maior presença foram o 2º, 4º e 6º [20]. Por este motivo, para a caracterização da falta foram escolhidos os harmônicos pares de ordem 2, 4 e 6 e os ímpares de ordem 3 e 5. Os valores das amplitudes dos componentes seguem os valores da Tabela 5, para solo úmido, pelo motivo já explicado. Este detector também utiliza o algoritmo de extração de corrente de carga utilizado pelo detector de arco e só é executado após a confirmação do rompimento e toque do cabo no solo e existência de arco.

A lógica do detector de harmônicos é exibida no fluxograma da Figura 89. Caso o rompimento do condutor e a existência de arco tenham sido confirmados, o detector de arco analisa a amplitude de cada harmônico. Se algum deles ultrapassar o valor estipulado (ter seu *flag* acionado), uma variável que confirma a presença deste componente assume valor unitário. Enquanto o arco existir os componentes de interesse serão procurados a cada passo da janela e estas variáveis manterão o seu valor. Isso foi feito pois a literatura não aponta que os componentes das frequências estejam presentes em todos os ciclos, portanto, o algoritmo procura por eles durante a ocorrência do arco. Como mencionado na seção 6.2.3, pela experiência de simulações, o arco é detectado até o 4º ciclo, isso indica que, das simulações de falta analisadas, todos os harmônicos de interesse são detectados até, no máximo, o quarto ciclo.

Figura 89 - Fluxograma do Detector de Harmônicos.

6.2.5 Detector de Variação de Harmônicos de Interesse

O detector de variação de harmônicos de interesse segue o mesmo princípio do detector de harmônicos, porém, o valor da variação, que ativa o *flag* de variação é estipulado pelo usuário. O *flag* é acionado quando o valor da diferença absoluta dos harmônicos de duas janelas consecutivas for maior que a porcentagem parametrizada para o menor entre os dois valores. As mesmas ordens harmônicas (2 a 6) são observadas neste detector, como mostra o fluxograma da Figura 90. Diferente do detector de harmônicos, o detector de variação obriga que, durante a ocorrência do arco, em pelo menos um ciclo todos os harmônicos analisados apresentem variação. Esta lógica visa observar a natureza dinâmica do arco.

Figura 90 - Fluxograma do Detector de Variação de Harmônicos.

6.2.6 Detector de Falta

Esta é a lógica final que examina se houve ou não a falta de alta impedância no sistema. Ela analisa se houve confirmação de rompimento do condutor, se existem os harmônicos procurados, se houve variação destes harmônicos, se o número de arcos foi maior do que o parametrizado e se o tempo mínimo de queda foi respeitado. Se estes resultados forem positivos, a falta é detectada, como mostra o diagrama da Figura 91.

Figura 91 - Fluxograma da Detecção de Falta.

7 Simulações de Falta e Parametrização dos Indicadores e Limites do Algoritmo

Esta seção apresenta os testes de detecção de FAI usando o modelo e o algoritmo propostos. Serão descritos os parâmetros e valores utilizados nas simulações e os pontos nos quais as faltas foram aplicadas. O resultado das simulações será avaliado pela capacidade do algoritmo de reconhecer uma FAI e o tempo para que a detecção ocorra.

7.1 Sistema de Distribuição e Parametrização do Modelo

O sistema de distribuição utilizado é o IEEE de 34 barras [92], o qual foi modelado no ATP. Ele foi escolhido por ser um sistema com cargas e trechos de linha diversificados. Ainda, este sistema está bem consolidado e é amplamente utilizado nos mais variados estudos em sistemas de distribuição. A tensão do alimentador é de 24,9 kV entre fases. Seu diagrama unifilar simplificado é mostrado na Figura 92.

Figura 92 - Diagrama Unifilar IEEE 34 Barras. *Fonte:* [92].

Foram escolhidas 4 barras do sistema para a aplicação das faltas: 806, 830, 858 e 846. A leitura de corrente é feita na subestação, na barra 800.

Devido ao grande número de parâmetros do modelo que o usuário pode ajustar, um trabalho que estude o impacto de cada variação deve ser feito em pesquisas futuras. Por hora, os testes serão realizados para os três tipos de solo (molhado, seco e arenoso), utilizando os mesmos valores de parâmetros para cada um deles. É importante lembrar que os parâmetros são fixos, mas as características da corrente variam de modo aleatório, respeitando estes ajustes. Os valores foram escolhidos para as simulações de modo a representar sinais com assimetria leve com probabilidade média de ocorrência ($z1r2 = 15\%$, $pz1r2 = 40\%$), esporádicos picos na assimetria ($z2r2 = 40\%$, $pz2r2 = 5\%$), modulação leve, com probabilidade média de ocorrência ($z1r3 = 20\%$, $z2r3 = 20\%$, $pz1r3 = 30\%$, $pz2r3 = 30\%$) e valores de patamar de curtos a longos ($mincic = 4$, $maxcic = 20$), tempo de queda para poste de 8 m e existência de *buildup*. Os valores de V_p e V_n foram retirados da literatura [5]. O tempo de simulação foi de 10 s. Caso este tempo seja extrapolado será considerado que o algoritmo não detectou a falta.

- Taxa de amostragem = 512 pontos por ciclos.
- Tempo de simulação = 10 s.
- $V_p = 8092$ V e $V_n = 9358$ V [5].
- $tromp = 0,3$ s.
- $ttoque = 1,58$ s, que equivale a $(0,3 \text{ s} + 1,28 \text{ s})$.
- $ifalta = 10$ A.
- $cbup = 10$ ciclos.
- solo = 0, 1 e 2.
- $z1r2 = 15\%$.
- $z2r2 = 40\%$.
- $pz1r2 = 40\%$.
- $pz2r2 = 5\%$.
- $z1r3 = 20\%$.
- $z2r3 = 20\%$.
- $pz1r3 = 30\%$.

- $pz2r3 = 30 \%$.
- $mincic = 4$.
- $maxcic = 20$.

As variáveis do algoritmo de detecção de FAI foram parametrizadas de acordo com as características que se deseja encontrar no sinal de falta gerado pelo modelo e de acordo com a experiência de simulações:

- Limite de assimetria = 3 %.
- Porcentagem de perda = 1 %.
- Porcentagem do aumento eficaz = 0,3 %.
- IEIH = 7.
- Tempo máximo de reset do rompimento = 1,5 s.
- Tempo mínimo de queda = 1 s.
- Número ciclos de reconhecimento de arco = 5.
- Número mínimo de ciclos de *buildup* = 3.
- Porcentagem mínima de 2º harmônico = 0,14 %;
- Porcentagem mínima de 3º harmônico = 0,83 %;
- Porcentagem mínima de 4º harmônico = 0,16 %;
- Porcentagem mínima de 5º harmônico = 0,35 %;
- Porcentagem mínima de 6º harmônico = 0,05 %;

Para cada tipo de solo as simulações foram feitas do seguinte modo: em cada uma das barras escolhidas foram feitas 10 simulações para cada fase, totalizando 30 simulações por barra. Com 4 barras e 3 tipos de solo, no total, foram analisados 360 casos de falta.

7.2 Resultados do Algoritmo de Detecção

Após todos os casos terem sido simulados no ATP, as oscilografias de corrente da fase na qual a FAI foi aplicada foram passadas, uma a uma, para o algoritmo de detecção, cujo papel é informar se houve ou não falta. Em caso positivo, o algoritmo retorna o tempo de detecção, medido desde o instante de detecção do rompimento do condutor ao momento em que a falta é detectada. Desse tempo, foi subtraído o tempo de queda do condutor.

Da Figura 93 à Figura 96, para cada tipo de solo o tempo de detecção é apresentado no eixo das ordenadas. No eixo das abscissas os casos são apresentados seguindo a ordem do ponto mais perto da subestação ao mais afastado. A ordem das fases segue a convenção do ATP: a, b e c. A Figura 93 mostra o resultado das simulações em solo molhado. Para os três tipos de solo, em todas as fases e trechos, as faltas foram detectadas. Os tempos médio, mínimo e máximo de detecção são, respectivamente, 0,34 s, 0,1 s e 1,17 s.

Figura 93 - Tempo de Detecção Solo Molhado.

A Figura 94 mostra o resultado das simulações em solo seco. Os tempos médio, mínimo, máximo de detecção são, respectivamente, 0,32 s, 0,1 s e 1,07 s.

Figura 94 - Tempo de Detecção Solo Seco.

A Figura 95 mostra o resultado das simulações em solo arenoso. A Figura 96 é um detalhe da Figura 95, para melhor distinção visual dos tempos por caso simulado. Os tempos médio, mínimo, máximo de detecção são, respectivamente, 0,19 s, 0,08 s e 2,93 s.

Figura 95 - Tempo de Detecção Solo Arenoso.

Figura 96 - Detalhe do Tempo de Detecção Solo Arenoso.

Das 360 simulações, considerando todos os tipos de solo, o menor tempo de detecção foi de 0,08 s, em solo arenoso e o tempo máximo foi de 2,93 s, também neste solo. Excluindo este último caso, que apresentou maior tempo de detecção, todos os 359 casos apresentaram tempo de detecção igual ou menor a 1,17 s.

As simulações mostraram que o tempo de detecção, independentemente do tipo de solo na qual a falta foi analisada, não apresenta relação direta com a distância do alimentador na qual a falta foi aplicada. Este comportamento fica evidente nos gráficos, dos quais se vê que existem casos cujo tempo de detecção é maior em trechos mais próximos ao alimentador e casos onde o oposto ocorre.

A aleatoriedade da corrente de falta, seja na mudança de assimetria, modulação, tempo de existência e inexistência do arco causou variação nos tempos de detecção em cada tipo de solo, porém, é possível notar o tempo médio de detecção foi menor quanto mais seco o solo, seguindo a ordem: molhado, seco e arenoso. Este comportamento se deve ao fato que quanto mais seco o solo, os arcos apresentam maior duração e, portanto, o algoritmo é capaz de detectar logo nos primeiros ou no primeiro arco, as características de uma FAI.

8 Conclusões

Nesta dissertação a falta de alta impedância foi estudada por diversas óticas. Foram explicadas suas causas, a progressão temporal de eventos, comportamento da tensão e, principalmente, da corrente, com respeito a parâmetros no tempo e na frequência. Ainda, foi estudado como o meio influencia o fenômeno. Os modelos elétricos que procuram representar as FAI foram apresentados, sendo apontadas as vantagens e desvantagens do uso de cada um deles. Oscilografias de ensaios em campo e laboratoriais traçaram um perfil do comportamento da falta.

O modelo de falta de alta impedância proposto neste trabalho foi embasado em características e estudos de sinais de falta presentes na literatura. O sinal por ele gerado foi comparado visualmente com sinais de falta reais. Para melhor análise da capacidade do modelo em reproduzir as características geradas por sinais de faltas reais, um algoritmo de detecção foi elaborado com o objetivo de detectar a ocorrência da falta por meio da observação e análise de valores e atributos das características de sinais de ensaios e testes.

O desenvolvimento do modelo, apresentado no Capítulo 5, foi concebido de modo a desagregar as características do sinal de falta, para que seja possível a parametrização individual de cada uma delas. Em consequência, é possível que sejam determinados o tempo de rompimento e toque do condutor ao solo, a tensão de ignição do arco, o tipo de solo no qual a falta ocorre, o número de ciclos de *buildup*, a probabilidade de ocorrência de assimetria e sua amplitude, a probabilidade e duração das modulações produzidas pela variação da resistência do arco e a amplitude da corrente de falta.

Em virtude da vasta possibilidade de parametrização e, portanto, reprodução de características de variados sinais de corrente possíveis de ocorrer em uma falta de alta impedância, em comparação com os modelos estudados, o modelo proposto se apresenta mais flexível e capaz de reproduzir um conjunto maior e mais variado de sinais. Aliado a esta vantagem, o modo com que foi concebido confere ao modelo a capacidade de suprir uma carência dos modelos estudados na literatura: aleatoriedade característica da natureza do fenômeno.

O modelo foi desenvolvido em um dos programas mais utilizados e bem consolidados para o estudo de transitórios eletromagnéticos, o ATP, ficando como contribuição para futuros estudos da comunidade científica.

Ainda existe espaço para melhorias deste modelo, como a variação aleatória da tensão de ignição do arco e a reprodução do espectro de alta frequência.

Como parte da validação da resposta do modelo de FAI proposto, o algoritmo de detecção, proposto no Capítulo 6, objetivou observar as características dos sinais de falta presentes na literatura. O cálculo dos índices de detecção foram o suporte das lógicas de detecção, que analisaram o rompimento do condutor, a ocorrência do *buildup*, a presença de arco, a existência de componente harmônicos e sua variação temporal e a geração de frequências inter-harmônicas. Com base nestas análises o detector de falta pode identificar a ocorrência da falha.

O algoritmo foi desenvolvido em módulos, compostos por diversas funções, cada uma responsável pela execução de pequenas lógicas e tarefas. Esta concepção permitiu com que na lógica final fosse possível parametrizar as variáveis de detecção de modo individual, tal como em um relé comercial. Essa flexibilidade permite não apenas o estudo da detecção das características de modo individual, como prepara a lógica para futuros aperfeiçoamentos.

Os testes feitos com o algoritmo de detecção, tendo como entrada sinais de falta gerados pelo modelo, o qual foi inserido em um sistema de distribuição, resultou em 100% de detecção. Os tempos de atuação variaram para cada tipo de solo. O tempo médio de detecção foi menor quanto mais seco o solo, seguindo a ordem: molhado, seco e arenoso, com tempos de 0,34 s, 0,32 s e 0,19 s respectivamente. Este fato se deve a quanto mais seco o solo, os arcos apresentam maior duração e, portanto, o algoritmo é capaz de detectar logo nos primeiros ou no primeiro arco, as características de uma FAI, sem que o arco se extinga e a detecção tenha que esperar a ocorrência de outro arco.

O sucesso na detecção aponta que os sinais de falta de alta impedância produzidos pelo modelo possuem as características de falta que se aproximam das encontradas em sinais reais. Para que esta validação fosse possível, o sistema no qual o modelo foi inserido não é poluído, ou seja, suas cargas são lineares e não existe a influência de eventos que não uma falta de alta impedância, como chaveamento de banco de capacitores, mudança de taps dos reguladores de tensão, faltas de baixa impedância, dentre outros. Por este motivo, estes eventos e condições não foram estudados ou incorporados no algoritmo de detecção.

8.1 Sugestões Para Trabalhos Futuros

A elaboração do modelo e do algoritmo de detecção apresentaram resultados satisfatórios, contudo, não foi possível abranger e estudar possibilidades interessantes e necessárias para fazer do modelo uma representação completa e definitiva de uma falta de alta impedância e do algoritmo de detecção uma lógica que possa ser embarcada em um relé comercial. Para atingir estes dois objetivos, existe ainda muita pesquisa a ser feita e um longo caminho de testes e validações. Esta seção apresenta algumas sugestões que, porventura, possam servir à continuação desta pesquisa, ou criação de outras.

- Obter sinais de falta de alta impedância reais e, por meio de ferramentas de extração de características, comparar com os resultados gerado pelo modelo com os sinais reais, para melhor validação.
- Incluir no modelo de falta de alta impedância:
 - Variação da tensão de ignição do arco.
 - Representação do espectro de alta frequência.
 - Relacionar os tipos de solo às suas características de modo mais detalhado, a exemplo: solos molhados apresentam menores distorções de corrente que solos secos.
- Aprimorar o algoritmo de detecção:
 - Gerar mais testes com o modelo em diferentes configurações e sistemas de distribuição.
 - Agregar ao algoritmo de detecção funções de pré-processamento e filtragem do sinal de falta, para sistemas já poluídos.
 - Elaborar detecção trifásica, com identificação da fase na qual ocorreu o defeito.
 - Melhorar a detecção de rompimento do condutor, passando apenas da análise do valor eficaz para observação do fenômeno transitório que ocorre neste instante.
 - Com a melhoria da detecção do rompimento, estender a análise de FAI para contato indireto.

- Incluir a transformada Wavelet na detecção da falta, observando, talvez, mudanças de assimetria bruscas e os momentos de ignição do arco.
- A partir do modelo de FAI melhorado e validado ou de sinais reais, incluir no algoritmo a distinção do tipo de solo no qual a falta está ocorrendo (molhado, seco e arenoso), talvez pela observação da duração dos arcos e a distorção da forma de onda, a fim de poder variar os limites de números de ciclos de ocorrência de arco para a detecção e também poder fazer a distinção de outros fenômenos de modo mais preciso.
- Como sugestão final, uma vez que esta pesquisa teve foco no desenvolvimento de um modelo de falta de alta impedância e em um algoritmo de detecção para sua validação, após a melhoria deste algoritmo, é interessante estender o estudo para, além da detecção, localizar o ponto de ocorrência da falta.

9 Referências

- [1] B. D. Russell, R. P. Chinchali, and C. J. Kim, “Behaviour of low frequency spectra during arcing fault and switching events,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 3, no. 4, pp. 1485–1492, 1988.
- [2] C. G. Wester, “High impedance fault detection on distribution systems,” *Rural Electr. Power Conf. Present. 42nd Annu. Conf.*, pp. c5-1–5, 1998.
- [3] W. Mai, B. T. Phung, and E. Ambikairajah, “Detection of high impedance faults in medium voltage distribution networks,” *2012 10th Int. Power Energy Conf.*, pp. 562–567, Nov. 2012.
- [4] J. C. Chen, B. T. Phung, D. M. Zhang, T. Blackburn, and E. Ambikairajah, “Study on high impedance fault arcing current characteristics,” *2013 Australas. Univ. Power Eng. Conf.*, no. October, pp. 1–6, Sep. 2013.
- [5] T. M. Lai, L. A. Snider, E. Lo, and D. Sutanto, “High-Impedance Fault Detection Using Discrete Wavelet Transform and Frequency Range and RMS Conversion,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 1, pp. 397–407, Jan. 2005.
- [6] M. Sedighizadeh, A. Rezazadeh, and N. I. Elkalashy, “Approaches in High Impedance Fault Detection - A Chronological Review,” *Adv. Electr. Comput. Eng.*, vol. 10, no. 3, pp. 114–128, 2010.
- [7] D. A. de Oliveira Junior, “Faltas De Alta Impedância : Detecção E Localização De Rompimento De Condutores Em Circuito Primário De Redes Aéreas De Distribuição Baseado Em Desequilíbrio De Tensão,” *Dissertação (Mestrado em Ciências)-Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte*, 2006.
- [8] R. M. Nakagomi, “Proposição de um Sistema para Simulação de Faltas de Alta Impedância em Redes de Distribuição Proposição de um Sistema para Simulação de Faltas de Alta Impedância em Redes de Distribuição,” *Dissertação (Mestrado em Ciências)-Universidade de São Paulo, São Paulo*, 2006.
- [9] J. C. G. Arias, “Identificação de Faltas de Alta Impedância em Redes Aéreas Multiaterradas,” *Universidade de São Paulo, São Paulo*, 2015.

- [10] S. R. Nam, J. K. Park, Y. C. Kang, and T. H. Kim, "A modeling method of a high impedance fault in a distribution system using two series time-varying resistances in EMTP," in *2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262)*, 2001, vol. 2, no. C, pp. 1175–1180 vol.2.
- [11] A. C. Depew, J. M. Parsick, R. W. Dempsey, B. D. Russell, and M. G. Adamiak, "Field Experience with High-Impedance Fault Detection Relays," in *2005/2006 PES TD*, 2006, pp. 868–873.
- [12] B. M. Aucoin and B. D. Russell, "Detection of incipient and low current faults in electric distribution systems (of spacecraft)," *Proc. 24th Intersoc. Energy Convers. Eng. Conf.*, pp. 153–158, 1989.
- [13] SEL, "Identificando Faltas de Alta ImpedânciaAjuste do Algoritmo AST do Relé SEL-451," 2016. [Online]. Available: <https://selinc.com/products/451/>.
- [14] C. L. Benner and B. D. Russell, "Automated fault analysis using an intelligent monitoring system," *2009 62nd Annu. Conf. Prot. Relay Eng.*, pp. 224–235, Mar. 2009.
- [15] L. Li, "A review of techniques to detect downed conductors in overhead distribution systems," *7th Int. Conf. Dev. Power Syst. Prot.*, no. 479, pp. 169–172, 2001.
- [16] CPFL, "Norma Técnica: Fornecimento em Tensão Primária 15kV , 25kV e 34 , 5kV - Volume 4.1 - Desenhos." 2015.
- [17] Agência Nacional de Energia Elétrica, "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica," *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST*. pp. 1–76, 2016.
- [18] Keng-Yu Lien, Shi-Lin Chen, Ching-Jung Liao, Tzong-Yih Guo, Tsair-Ming Lin, and Jer-Sheng Shen, "Energy variance criterion and threshold tuning scheme for high impedance fault detection," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 14, no. 3, pp. 810–817, Jul. 1999.
- [19] R. E. Lee and M. T. Bishop, "A Comparison of Measured High Impedance Fault Data to Digital Computer Modeling Results," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-104, no. 10, pp. 35–36, 1985.

- [20] C. J. Kim and B. Don Russell, "Harmonic behavior during arcing faults on power distribution feeders," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 14, no. 3, pp. 219–225, Jun. 1988.
- [21] F. M. Uriarte, "Modelling, Detection and Localization of High-Impedance Faults In Low-Voltage Distribution Feeders," Blacksburg, 2003.
- [22] R. E. Lee and M. T. Bishop, "Performance Testing of the Ratio Ground Relay on a Four-Wire Distribution Feeder," *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. PER-3, no. 9, pp. 28–29, Sep. 1983.
- [23] B. M. Aucoin and B. D. Russell, "Distribution High Impedance Fault Detection Utilizing High Frequency Current Components," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-101, no. 6, pp. 1596–1606, Jun. 1982.
- [24] D. I. Jerrings and J. R. Linders, "Ground Resistance-Revisited," *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. 9, no. 4, pp. 54–54, Apr. 1989.
- [25] M. Aucoin, "Status of High Impedance Fault Detection," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-104, no. 3, pp. 637–644, Mar. 1985.
- [26] B. D. Russell and C. L. Benner, "Intelligent Systems for Improved Reliability and Failure Diagnosis in Distribution Systems," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 1, no. 1, pp. 48–56, Jun. 2010.
- [27] D. I. Jeerings and J. R. Linders, "A practical protective relay for down-conductor faults," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 6, no. 2, pp. 565–574, Apr. 1991.
- [28] S. R. Samantaray, B. K. Panigrahi, and P. K. Dash, "High impedance fault detection in power distribution networks using time–frequency transform and probabilistic neural network," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 2, no. 2, p. 261, 2008.
- [29] V. Ziolkowski, "Estratégias experimentais para ensaios de faltas fase-terra com alta impedância em sistemas de distribuição de energia elétrica," Dissertação (Mestrado em Ciências)-Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- [30] S. Hänninen and M. Lehtonen, "Characteristics of earth faults in electrical distribution networks with high impedance earthing," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 44, no. 3, pp. 155–161, Mar. 1998.
- [31] I. Zamora, a. J. Mazon, K. J. Sagastabeitia, and J. J. Zamora, "New Method for Detecting Low Current Faults in Electrical Distribution Systems," *IEEE Trans.*

Power Deliv., vol. 22, no. 4, pp. 2072–2079, Oct. 2007.

- [32] A. R. Sedighi and M. R. Haghifam, “Simulation of High Impedance Ground Fault In Electrical Power Distribution Systems,” *2010 Int. Conf. Power Syst. Technol.*, pp. 1–7, 2010.
- [33] A.-R. Sedighi, M.-R. Haghifam, O. P. Malik, and M.-H. Ghassemian, “High Impedance Fault Detection Based on Wavelet Transform and Statistical Pattern Recognition,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 4, pp. 2414–2421, Oct. 2005.
- [34] S. Hänninen and M. Lehtonen, “Method for detection and location of very high resistive earth faults,” *Eur. Trans. Electr. Power*, vol. 9, no. 5, pp. 285–291, Sep. 1999.
- [35] A. Nikander, “Novel algorithms for earth fault indication based on monitoring of shunt resistance of MV feeder as a part of relay protection,” *7th Int. Conf. Dev. Power Syst. Prot.*, no. 479, pp. 430–433, 2001.
- [36] A.-R. Sedighi, M.-R. Haghifam, and O. P. Malik, “Soft computing applications in high impedance fault detection in distribution systems,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 76, no. 1–3, pp. 136–144, 2005.
- [37] K. M. Shebl, E. A. Badran, I. Member, and E. Abdalla, “A Combined MODELS-TACS ATPdraw General Model of the High Impedance Faults in Distribution Networks,” no. 1, pp. 527–531, 2010.
- [38] L. Garcia-Santander, P. Bastard, M. Petit, I. Gal, E. Lopez, and H. Opazo, “Down-conductor fault detection and location via a voltage based method for radial distribution networks,” *IEE Proc. - Gener. Transm. Distrib.*, vol. 152, no. 2, p. 180, 2005.
- [39] C. J. Kim, Jeong Hoon Shin, Myeong-Ho Yoo, and Gi Won Lee, “A study on the characterization of the incipient failure behavior of insulators in power distribution line,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 14, no. 2, pp. 519–524, Apr. 1999.
- [40] A. F. Sultan and G. W. Swift, “Security testing of high impedance fault detectors,” *[Proceedings] WESCANEX '91*, pp. 191–197, 1991.
- [41] T. M. Lai, L. a. Snider, and E. Lo, “Wavelet transform based relay algorithm for the detection of stochastic high impedance faults,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 76, no.

- 8, pp. 626–633, 2006.
- [42] H. Calhoun, M. T. Bishop, C. H. Eichler, and R. E. Lee, “Development and Testing of an Electro-Mechanical Relay to Detect Fallen Distribution Conductors,” *IEEE Power Eng. Rev.*, vol. PER-2, no. 6, pp. 50–51, Jun. 1982.
 - [43] A. E. Emanuel, D. Cyganski, J. A. Orr, S. Shiller, and E. M. Gulachenski, “High impedance fault arcing on sandy soil in 15 kV distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 5, no. 2, pp. 676–686, Apr. 1990.
 - [44] D. Carvalho, J. R. Macedo, J. W. Resende, F. C. Castro, and C. A. Bissochi, “Proposition of an interharmonic-based methodology for high-impedance fault detection in distribution systems,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 9, no. 16, pp. 2593–2601, Dec. 2015.
 - [45] A. Lazkano, J. Ruiz, L. a. Leturiondo, and E. Aramendi, “High impedance arcing fault detector for three-wire power distribution networks,” in *2000 10th Mediterranean Electrotechnical Conference. Information Technology and Electrotechnology for the Mediterranean Countries. Proceedings. MeleCon 2000 (Cat. No.00CH37099)*, 2000, vol. 3, pp. 899–902.
 - [46] T. Gammon and J. Matthews, “The historical evolution of arcing-fault models for low-voltage systems,” *1999 IEEE Ind. Commer. Power Syst. Tech. Conf.*, p. 6, 1999.
 - [47] T. H. Lee, “Plasma physics and the interruption of an electric circuit,” *Proc. IEEE*, vol. 57, no. 3, pp. 307–323, 1969.
 - [48] G. D. Gregory and G. W. Scott, “The arc-fault circuit interrupter, an emerging product,” *1998 IEEE Ind. Commer. Power Syst. Tech. Conf.*, vol. 34, no. 5, pp. 48–55, 1998.
 - [49] S. B. Dewan and A. Straughen, *Power semiconductor circuits*. John Wiley & Sons, 1975.
 - [50] H. Edels, “Properties and theory of the electric arc. A review of progress,” *Proc. IEE Part A Power Eng.*, vol. 108, no. 37, p. 55, 1961.
 - [51] W. Zhang, Y. Jing, and X. Xiao, “Model-Based General Arcing Fault Detection in Medium-Voltage Distribution Lines,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 31, no. 5, pp.

2231–2241, Oct. 2016.

- [52] T. Gammon and J. Matthews, “Arcing-fault models for low-voltage power systems,” *2000 IEEE Ind. Commer. Power Syst. Tech. Conf.*, pp. 119–126, 2000.
- [53] J. M. Meek, “A Theory of Spark Discharge,” *Phys. Rev.*, vol. 57, no. 8, pp. 722–728, 1940.
- [54] G. Idarraga Ospina, D. Cubillos, and L. Ibanez, “Analysis of arcing fault models,” *2008 IEEE/PES Transm. Distrib. Conf. Expo. Lat. Am.*, pp. 1–5, Aug. 2008.
- [55] A. F. Sultan, G. W. Swift, and D. J. Fedirchuk, “Detecting arcing downed-wires using fault current flicker and half-cycle asymmetry,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 9, no. 1, pp. 461–470, 1994.
- [56] M. Aucoin and B. D. Russell, “Detection of Distribution High Impedance Faults Using Burst Noise Signals near 60 HZ,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 2, no. 2, pp. 342–348, 1987.
- [57] R. Z. Fanucchi, “A Detecção e a Localização de Faltas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição utilizando Transformadas Wavelets e Redes Neurais Artificiais,” Dissertação (Mestrado em Ciências)-Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.
- [58] “Mineralogical Research Company,” 1998. [Online]. Available: <http://www.minresco.com/fulgurites/fulgurites.htm>. [Accessed: 09-Mar-2016].
- [59] S. Committee, *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System - Redline*, vol. 2012, no. December. New York, 2012.
- [60] C. Benner, P. Carswell, and B. Don Russell, “Improved algorithm for detecting arcing faults using random fault behavior,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 17, no. 1, pp. 49–56, Jul. 1989.
- [61] B. D. Russell and R. P. Chinchali, “A digital signal processing algorithm for detecting arcing faults on power distribution feeders,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 4, no. 1, pp. 132–140, 1989.
- [62] A. A. Girgis, W. Chang, and E. B. Makram, “Analysis of high-impedance fault generated signals using a Kalman filtering approach,” *IEEE Trans. Power Deliv.*,

- vol. 5, no. 4, pp. 1714–1724, 1990.
- [63] N. Zamanan and J. Sykulski, “The evolution of high impedance fault modeling,” *2014 16th Int. Conf. Harmon. Qual. Power*, pp. 77–81, May 2014.
 - [64] A. M. Sharaf, L. A. Snider, and K. Debnath, “A neural network based relaying scheme for distribution system high impedance fault detection,” *Proc. 1993 First New Zeal. Int. Two-Stream Conf. Artif. Neural Networks Expert Syst.*, pp. 321–324, 1993.
 - [65] D. C. Yu and S. H. Khan, “An adaptive high and low impedance fault detection method,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 9, no. 4, pp. 1812–1821, 1994.
 - [66] David Chan Tat Wai and Xia Yibin, “A novel technique for high impedance fault identification,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 13, no. 3, pp. 738–744, Jul. 1998.
 - [67] R. A. Flauzino, “Identificação e localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição baseadas em decomposição por componentes ortogonais e inferência Fuzzy,” Tese (Doutorado) -Universidade de São Paulo, 2007.
 - [68] L. Prikler and H. K. Høidalen, “ATPDRAW Users Manual,” no. 1. p. 270, 2009.
 - [69] W. C. Santos, F. B. Costa, N. S. D. Brito, and B. A. Souza, “Considerações sobre Diferentes Maneiras de Modelagem de Faltas de Alta Impedância,” pp. 1–5, 2012.
 - [70] W. C. dos Santos, B. A. de Souza, N. S. D. Brito, F. B. Costa, and M. R. C. Paes, “High Impedance Faults: From Field Tests to Modeling,” *J. Control. Autom. Electr. Syst.*, vol. 24, no. 6, pp. 885–896, Dec. 2013.
 - [71] Y. Sheng and S. M. Rovnyak, “Decision tree-based methodology for high impedance fault detection,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 19, no. 2, pp. 533–536, 2004.
 - [72] M. Michalik, W. Rebizant, M. Lukowicz, Seung-Jae Lee, and Sang-Hee Kang, “Wavelet transform approach to high impedance fault detection in MV networks,” in *2005 IEEE Russia Power Tech*, 2005, pp. 1–7.
 - [73] A. Hochrainer, “A proposal for the establishment of an equivalent restriking voltage for circuit breakers’,” *CIGRE, Rept*, vol. 151, 1958.
 - [74] J. F. James, *A Student’s Guide to Fourier Transforms*, Third. New York: Cambridge University Press, 2011.

- [75] V. Torres and H. Ruiz, "High Impedance Fault Detection Using Discrete Wavelet Transform," *2011 IEEE Electron. Robot. Automot. Mech. Conf.*, pp. 325–329, Nov. 2011.
- [76] D. Barbosa, "Sistema Híbrido Inteligente para o Monitoramento e Proteção de Transformadores de Potência," Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.
- [77] Hermes Manoel Galvão Castelo, "Uma Estratégia para a Detecção e Classificação de Transitórios em Transformadores de Potência pela Utilização da Transformada Wavelet e da Lógica Fuzzy," Dissertação (Mestrado em Ciências)- Universidade de São Paulo, São Carlos, São Carlos, 2009.
- [78] R. M. Reedy and W. A. Elmore, "Electromechanical Relay to Detect Fallen Distribution Conductors," in *American Public Power Association conference, San Antonio*, 1983.
- [79] A. M. Sharaf and S. I. Abu-Azab, "A smart relaying scheme for high impedance faults in distribution and utilization networks," in *2000 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Conference Proceedings. Navigating to a New Era (Cat. No.00TH8492)*, 2000, vol. 2, pp. 740–744.
- [80] Ching-Lien Huang, Hui-Yung Chu, and Ming-Tong Chen, "Algorithm comparison for high impedance fault detection based on staged fault test," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 3, no. 4, pp. 1427–1435, 1988.
- [81] S. J. Balser, K. A. Clements, and D. J. Lawrence, "A Microprocessor-Based Technique for Detection of High Impedance Faults," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 1, no. 3, pp. 252–258, 1986.
- [82] Y. F. Li and K. F. Chen, "Eliminating the picket fence effect of the fast Fourier transform," *Comput. Phys. Commun.*, vol. 178, no. 7, pp. 486–491, Apr. 2008.
- [83] A. H. Eldin, N. Mohamed, and E. Abdallah, "Detection of High Impedance Faults in Medium Voltage Distribution Networks Using Discrete Wavelet Transform," in *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*, 2013, no. 202, pp. 0202–0202.
- [84] F. B. Costa, B. A. Souza, N. S. D. Brito, J. A. C. B. Silva, and W. C. Santos, "Real-Time Detection of Transients Induced by High-Impedance Faults Based on the

- Boundary Wavelet Transform,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 6, pp. 5312–5323, Nov. 2015.
- [85] Z. Wang, S. McConnell, R. S. Balog, and J. Johnson, “Arc fault signal detection - Fourier transformation vs. wavelet decomposition techniques using synthesized data,” in *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, 2014, pp. 3239–3244.
- [86] M. Michalik, M. Lukowicz, W. Rebizant, S. Lee, and S.-H. Kang, “Verification of the Wavelet-Based HIF Detecting Algorithm Performance in Solidly Grounded MV Networks,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, no. 4, pp. 2057–2064, Oct. 2007.
- [87] M. R. Lukowicz and L. Kang, “High-Impedance Fault Detection in Distribution Networks With Use of Wavelet-Based Algorithm,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 21, no. 4, pp. 1793–1802, Oct. 2006.
- [88] A. Abdollahi and S. Seyedtabaai, “Comparison of fourier & wavelet transform methods for transmission line fault classification,” in *2010 4th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)*, 2010, no. June, pp. 579–584.
- [89] S. Sahoo and M. E. Baran, “A method to detect high impedance faults in distribution feeders,” *2014 IEEE PES T&D Conf. Expo.*, pp. 1–6, Apr. 2014.
- [90] G. Idarraga, D. Guillen, J. M. Ramirez, A. Zamora, and M. R. A. Paternina, “Detection and classification of faults in transmission lines using the maximum wavelet singular value and Euclidean norm,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 9, no. 15, pp. 2294–2302, Nov. 2015.
- [91] G. E. GE, “F60 Instruction Manual for 7.3x product version (Rev. AB2),” 2015. [Online]. Available: <https://www.gegridsolutions.com/app/ViewFiles.aspx?prod=f60&type=3>.
- [92] IEEE, “IEEE DISTRIBUTION TEST FEEDERS. Radial Distribution Test Feeders,” 2016. [Online]. Available: <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/index.html>. [Accessed: 02-Mar-2015].

Apêndice – Tempo de Intermitência dos Arcos

Tabela 9 - Tempo de Intermitência de Arcos em Diferentes Tipos de Solo [1].

Número de ciclos	SOLO MOLHADO		SOLO SECO		SOLO ARENOSO	
	Existência do arco (<i>con</i>). Número de Eventos (% do total)	Inexistência do arco (<i>coff</i>). Número de Eventos (% do total)	Existência do arco (<i>con</i>). Número de Eventos (% do total)	Inexistência do arco (<i>coff</i>). Número de Eventos (% do total)	Existência do arco (<i>con</i>). Número de Eventos (% do total)	Inexistência do arco (<i>coff</i>). Número de Eventos (% do total)
2	35	17	7,8	11	0	0
3	20	16	15	0	0	6,5
4	5	14	17,8	0	0	0
5	10	7,5	7,4	14	0	0
6	5	3	5,25	11	0	0
7	5	4	5,25	0	0	0
8	4	2	5,25	3	0	0
9	1	5,5	5,25	3	0	0
10	3	5	2,5	0	8	0
11	1	2	2,5	3	0	0
12	2	2	5	0	8	6,5
13	0	2	7,5	3	0	0
14	2	2	0	3	0	0
15	0	2	0	3	4	0
16	2	2	5	0	0	0
17	2	2	0	5,5	0	0
18	0	2	0	0	0	0
19	2	2	0	0	0	0
20	1	0	8,5	5,5	4	0
21	0	2	0	0	0	0
22	0	0	0	3	0	0
23	0	2	0	3	0	0
24	0	0	0	9	0	0
25	0	0	0	3	0	0
26	0	0	0	3	0	0
27	0	2	0	0	0	0
28	0	0	0	3	0	0
29	0	0	0	0	0	0
30	0	2	0	11	0	0
35	0	0	0	0	0	6,5
40	0	0	0	0	4	0
50	0	0	0	0	4	0
51	0	0	0	0	4	0
60	0	0	0	0	8	0
65	0	0	0	0	4	0
70	0	0	0	0	4	0
74	0	0	0	0	0	6,5
85	0	0	0	0	0	6,5
90	0	0	0	0	4	0
100	0	0	0	0	0	6,5
103	0	0	0	0	0	19
110	0	0	0	0	8	0
112	0	0	0	0	4	14
114	0	0	0	0	4	0
120	0	0	0	0	4	0
140	0	0	0	0	4	0
150	0	0	0	0	4	0
153	0	0	0	0	4	0
160	0	0	0	0	4	0
170	0	0	0	0	4	0
180	0	0	0	0	0	7
250	0	0	0	0	0	7
273	0	0	0	0	0	7
310	0	0	0	0	0	7