

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL – UCS
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

JEFERSON LUIS DANELUZ

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DA FUNÇÃO SENSITIVE GROUND FAULT (SGF) EM
REDES DE MÉDIA TENSÃO**

CAXIAS DO SUL

2022

JEFERSON LUIS DANELUZ

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DA FUNÇÃO SENSITIVE GROUND FAULT (SGF) EM
REDES DE MÉDIA TENSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado ao Centro de Ciências Exatas, da Natureza e de Tecnologia da Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientadora: Prof^a. Dra. Danusia de Oliveira de Lima.

CAXIAS DO SUL

2022

JEFERSON LUIS DANELUZ

**ANÁLISE DA APLICAÇÃO DA FUNÇÃO SENSITIVE GROUND FAULT (SGF) EM
REDES DE MÉDIA TENSÃO**

Trabalho parcial de Conclusão de Curso
para obtenção de grau de Bacharel em
Engenharia Elétrica. Curso de Bacharel em
Engenharia Elétrica da Universidade de
Caxias do Sul.

Aprovado em ___/___/_____

Banca Examinadora

Prof^a. Dra. Danusia de Oliveira de Lima
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Ms. André Bernardes Michel
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof^a. Dra. Andréa Cantarelli Morales
Universidade de Caxias do Sul – UCS

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pela oportunidade da vida e direcionamento dos caminhos que sigo.

À minha mãe Denair pela criação, educação e sua ajuda incondicional sempre que necessitei.

À minha esposa Valesca, minha maior incentivadora na graduação, pela sua colaboração e paciência nos momentos difíceis.

Ao meu filho Davi, exemplo de força e superação, que me inspira a buscar sempre o melhor.

À minha orientadora neste trabalho, professora Danusia, pelos ensinamentos, pela ajuda e paciência, muito obrigado.

E por fim a todos os professores e colegas com os quais aprendi muito durante esta jornada.

RESUMO

A detecção de faltas de alta impedância, há muito tempo vem desafiando a engenharia e seus equipamentos de proteção. As faltas de alta impedância (FAI) ocorrem quando um condutor entra em contato com objetos com uma alta resistência, o que não resulta em incrementos significativos de corrente, sendo mascarada pela corrente de carga. Este tipo de falta não pode ser detectada por dispositivos de proteção tradicionais que atuam por sobrecorrente. FAIs são um problema de segurança pública devido ao risco humano envolvido. Neste sentido, métodos de detecção de FAI vêm sendo foco de interesse de diversas pesquisas. Diversos fabricantes utilizam diferentes tipos de algoritmos para detectar estas faltas, porém ainda não se tem um sistema que detecte 100% das FAIs. Este trabalho tem como objetivo modelar faltas de alta impedância em um sistema de distribuição de média tensão, através de software computacional, utilizando dados de oscilografias contidas na literatura, de modo a se reproduzirem características que se aproximem das reais geradas na ocorrência do tipo de defeito em questão, e além disso, outro objetivo é modelar um relé de proteção, que possua a função SGF incorporada, afim de validar a detecção das faltas simuladas.

Os resultados obtidos no modelamento das faltas apresentaram as características esperadas, quando comparadas as características reais de FAIs e a modelagem da função SGF detectou todas as ocorrências de FAIs simuladas.

Palavras-chave: Faltas de Alta Impedância. Média Tensão. Modelar Faltas. Relé de Proteção. Função SGF. Detecção das Faltas.

ABSTRACT

High impedance fault detection has long challenged engineering and its protective equipment. High impedance faults (HIF) occur when a conductor comes into contact with objects with a high resistance, which do not result in significant current increases, being masked by the load current. This type of fault cannot be detected by traditional overcurrent protection devices. HIFs are a public safety issue due to the human risk involved. In this sense, HIF detection methods have been the focus of interest in several studies. Several manufacturers use different types of algorithms to detect these faults, but there is still no system that detects 100% of HIFs. The objective of this work is to model high impedance faults in a medium voltage distribution system, through computational software, using data from oscillograms contained in the literature, in order to reproduce characteristics that are close to the real ones generated in the field. occurrence of the type of fault in question, and in addition, another objective is to model a protection relay, which has the SGF function incorporated, in order to validate the detection of simulated faults.

The results obtained in the modeling of the faults presented the expected characteristics, when compared to the real characteristics of HIFs and the modeling of the SGF function detected all occurrences of simulated HIFs.

Keywords: High Impedance Faults. Medium Voltage. Model Faults. Protection Relay. SGF function. Fault Detection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de distribuição e os agentes envolvidos	17
Figura 2 – Disposição das redes de distribuição no poste.	19
Figura 3 – Diagrama unifilar de um sistema de distribuição radial simples	20
Figura 4 – Diagrama unifilar de um sistema de distribuição radial com seccionamento.	21
Figura 5 - Diagrama unifilar de um sistema de distribuição radial com recurso.	21
Figura 6 – Diagrama unifilar da rede de distribuição em anel	22
Figura 7 - Diagrama unifilar de uma FAI fase-terra.	24
Figura 8 – Sistema de experimento de Emanuel et al.	26
Figura 9 – Característica tensão-corrente de uma FAI.	27
Figura 10 – Oscilografia da corrente no condutor utilizado no ensaio.	28
Figura 11 – Shoulders.	28
Figura 12 - Modelo R_f e L_f para simulação de falta de alta impedância	30
Figura 13 - Circuito equivalente do modelo R_f e L_f	30
Figura 14 - Circuito modelo de FAI com arco.	31
Figura 15 - Modelo de FAI com resistências não lineares.	32
Figura 16 - Curto-circuito trifásico	37
Figura 17 - Curto-circuito bifásico.	37
Figura 18 - Curto-circuito monofásico	38
Figura 19 - Curto-circuito fase “a” - terra	39
Figura 20 - Curto-circuito fases “b e c” - terra.	41
Figura 21 - Diagrama de sequência do curto-circuito bifásico-terra	43
Figura 22 - Unidades lógicas de um relé digital.	46
Figura 23 - Ajuste do relé de sobrecorrente	49
Figura 24 - Diagrama vetorial do relé direcional.	50
Figura 25 - Diagrama de blocos do sistema de detecção da ABB	52
Figura 26 - Diagrama de blocos do sistema de detecção da SEL.	53
Figura 27 - Diagrama lógico da função direcional sensitiva - 67SEF	54
Figura 28 - Diagrama lógico da função instantânea sensitiva - 50SEF	54
Figura 29 - Diagrama lógico da função temporizada sensitiva - 51SEF	55
Figura 30 - Fluxograma da metodologia proposta.	57
Figura 31 - Sistema de distribuição base da simulação	58

Figura 32 - Modelo de FAI reproduzido no ATP	59
Figura 33 - Curva tensão x corrente do solo tipo asfalto	60
Figura 34 - Curva tensão x corrente do solo tipo calçamento	60
Figura 35 - Curva tensão x corrente do solo tipo grama	61
Figura 36 - Curva resistência x tempo do solo tipo asfalto	62
Figura 37 - Curva resistência x tempo do solo tipo calçamento	62
Figura 38 - Curva resistência x tempo do solo tipo grama	63
Figura 39 – Sistema de potência não aterrado com falha fase-terra no alimentador 3	64
Figura 40 - Plano de impedância de sequência zero	65
Figura 41 - Conexões típicas de transformadores de instrumentação a um dispositivo de proteção para um sistema de energia não aterrado	66
Figura 42 – Função ANSI 67SEF presente em um relé de proteção da Siemens	67
Figura 43 - Diagrama de blocos da função SGF modelada	67
Figura 44 - FAI inserida no ponto P1 do sistema	69
Figura 45 - FAI inserida no ponto P2 do sistema	69
Figura 46 - FAI inserida no ponto P3 do sistema	70
Figura 47 - Modelo do sistema de distribuição simulado	71
Figura 48 – Curva de tensão trifásica do sistema de distribuição simulado	72
Figura 49 - Curva de corrente trifásica do sistema de distribuição simulado	73
Figura 50 - Cronologia da FAI para solo do tipo asfalto	74
Figura 51 - Corrente da FAI solo tipo asfalto	75
Figura 52 - Detalhe da corrente de FAI solo tipo asfalto	75
Figura 53 - Corrente da FAI solo tipo calçamento	76
Figura 54 - Detalhe da corrente de FAI solo tipo calçamento	76
Figura 55 - Corrente da FAI solo tipo grama	77
Figura 56 - Detalhe da corrente de FAI solo tipo grama	77
Figura 57 - Modelagem do relé com função SGF e disjuntor	79
Figura 58 - Sequência de blocos da lógica da função SGF	80
Figura 59 - Leitura dos valores de sequência zero através das provas de medições	81
Figura 60 - Comutação da saída da função SGF na detecção da FAI em solo asfalto no ponto P3	82
Figura 61 - Modelo do disjuntor trifásico	83
Figura 62 - Modelagem completa do sistema	84

Figura 63 - Curva corrente trifásica FAI de solo do tipo asfalto, no ponto P1 com atuação do relé.....	84
Figura 64 - Curva corrente trifásica FAI de solo do tipo asfalto, no ponto P2	85
Figura 65 - Curva corrente trifásica FAI de solo do tipo asfalto, no ponto P3	86
Figura 66 – CASO 4: Curva corrente trifásica FAI de solo do tipo calçamento, no ponto P1	87
Figura 67 - CASO 5: Curva corrente trifásica FAI de solo do tipo calçamento, no ponto P2	88
Figura 68 - CASO 6: Curva corrente trifásica FAI de solo do tipo calçamento, no ponto P3	88
Figura 69 – CASO7: Curva corrente trifásica FAI de solo do tipo grama, no ponto P1	89
Figura 70 – CASO 8: Curva corrente trifásica FAI de solo do tipo grama, no ponto P2	90
Figura 71 – CASO 9: Curva corrente trifásica FAI de solo do tipo grama, no ponto P3	90
Figura 72 - FAI solo grama sem atuação da proteção	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Padrão de tensões em SEP	18
Tabela 2 – Magnitude das correntes de FAI.....	25
Tabela 3 - Tipos de curto-circuito	36
Tabela 4 - Impedâncias das linhas do modelo simulado	72
Tabela 5 - Valores das cargas utilizadas na simulação.....	72
Tabela 6 - Cronologia de simulação da FAI	74
Tabela 7 - Leitura das correntes, tensões e sequência 0 da FAI em asfalto no ponto P3.....	81
Tabela 8 - Valores da curva tensão x corrente do solo tipo asfalto	98
Tabela 9 - Valores da curva resistência x tempo do solo tipo asfalto	99
Tabela 10 - Valores da curva tensão x corrente do solo tipo calçamento	100
Tabela 11 - Valores da curva resistência x tempo do solo tipo calçamento	101
Tabela 12 - Valores da curva tensão x corrente do solo tipo grama	102
Tabela 13 - Valores da curva resistência x tempo do solo tipo grama	103
Tabela 14 - Valores de sequência 0 extraídos das ponteiros de prova, FAI solo tipo asfalto.....	107
Tabela 15 - Valores de sequência 0 extraídos das ponteiros de prova, FAI solo tipo calçamento	107
Tabela 16 - Valores de sequência 0 extraídos das ponteiros de prova, FAI solo tipo grama	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABB –	Asea Brow Boveri
ATP	Alternative Transient Program
BT –	Baixa Tensão
CC	Corrente contínua
FAI –	Falta de Alta Impedância
IEEE –	Institute of Electrical and Electronic Engineers
kHz –	Quilohertz
kV –	Quilovolt
MT –	Média Tensão
RMS –	Root Mean Square
SDEE –	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
SEL –	Schweitzer Engineering Laboratories
SEF	Sensitive Earth Fault
SEP –	Sistema Elétrico de Potência
SGF –	Sensitive Ground Fault
TC –	Transformador de Corrente
TP –	Transformador de Potência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	15
1.2	OBJETIVO GERAL	15
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	16
2	APLICAÇÃO DA FUNÇÃO SENSITIVE GROUND FAULT (SGF) EM REDES DE MÉDIA TENSÃO	17
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	17
2.2	REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA	17
2.2.1	Redes de Distribuição Primária	19
2.2.1.1	Rede Radial	20
2.2.1.2	Rede em Anel	22
2.2.2	Condutores da rede de distribuição	22
2.3	FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA (FAI)	23
2.3.1	Características de faltas de alta impedância em redes de distribuição	24
2.3.2	Modelos de falta de alta impedância	28
2.3.3	Testes reais de falta de alta impedância	32
2.4	CURTO-CIRCUITO	35
2.4.1	Tipos de curto circuito	36
2.4.1.1	Curto-circuito trifásico	36
2.4.1.2	Curto-circuito bifásico	37
2.4.1.3	Curto-circuito monofásico	37
2.4.2	Equacionamento de curto-circuito	38
2.4.2.1	Análise do curto-circuito fase-terra por Fortescue	38
2.4.2.2	Análise do curto-circuito bifásico-terra por Fortescue	40
2.5	PROTEÇÕES DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO	44
2.5.1	Equipamentos de proteção	45
2.5.1.1	Relés de proteção	45
2.5.1.1.1	Relés de sobrecorrente instantâneo/temporizado (Função 50/51)	48
2.5.1.1.2	Relés de sobrecorrente direcional (Função 67)	49
2.5.1.1.3	Relés com a função Sensitive Ground Fault (SGF)	50
3	METODOLOGIA	56

3.1	MODELAGEM DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO	58
3.2	MODELAGEM DA FAI	58
3.3	MODELAGEM DA FUNÇÃO SGF DO RELÉ DE PROTEÇÃO	63
3.4	ESTUDOS DE CASO.....	68
4	RESULTADOS	71
4.1	IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO	71
4.2	IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DE FAI.....	73
4.2.1	FAI para solo do tipo asfalto.....	74
4.2.2	FAI para solo do tipo calçamento.....	76
4.2.3	FAI para solo do tipo grama	77
4.3	IMPLEMENTAÇÃO DA FUNÇÃO SGF DO RELÉ DE PROTEÇÃO	78
4.4	RESULTADOS DOS ESTUDOS DE CASOS	83
4.4.1	Resultado CASO 1: Aplicação da FAI com solo do tipo asfalto no ponto P1.84	
4.4.2	Resultado CASO 2: Aplicação da FAI com solo do tipo asfalto no ponto P2.85	
4.4.3	Resultado CASO 3: Aplicação da FAI com solo do tipo asfalto no ponto P3.86	
4.4.4	Resultado CASO 4: Aplicação da FAI com solo do tipo calçamento no ponto P1.....	86
4.4.5	Resultado CASO 5: Aplicação da FAI com solo do tipo calçamento no ponto P2.....	87
4.4.6	Resultado CASO 6: Aplicação da FAI com solo do tipo calçamento no ponto P3.....	88
4.4.7	Resultado CASO 7: Aplicação da FAI com solo do tipo grama no ponto P1. 89	
4.4.8	Resultado CASO 8: Aplicação da FAI com solo do tipo grama no ponto P2. 89	
4.4.9	Resultado CASO 9: Aplicação da FAI com solo do tipo grama no ponto P3. 90	
5	CONCLUSÃO	92
	REFERÊNCIAS.....	94
	APÊNDICE A – VALORES OBTIDOS ATRAVÉS DAS CURVAS DE TENSÃO x CORRENTE E RESISTÊNCIA x TEMPO DE CADA UM DOS SOLOS.....	98
	APÊNDICE B – CÓDIGO MODELS DA FUNÇÃO SGF DO RELÉ DE PROTEÇÃO.....	104
	APÊNDICE C – VALORES DE TENSÃO E CORRENTE DE SEQUÊNCIA 0 OBTIDOS ATRAVÉS DAS PONTAS DE PROVAS DE CADA UM DOS SOLOS	107

1 INTRODUÇÃO

Faltas de alta impedância (FAIs), tais como as causadas pela queda de condutores da rede de distribuição ao solo, oferecem riscos tanto aos usuários quanto aos operadores do sistema elétrico. A baixa corrente gerada pelas FAIs dificulta a sua detecção e desafia os relés de proteção tradicionais. A queda de cabos energizados constitui-se em um grande problema de segurança para os seres vivos, que podem ser atingidos ou que podem entrar em contato acidental com estes condutores caídos, caso não ocorra a isolação desta ocorrência pelo equipamento de proteção (LEITE, 2017).

Nesse sentido, as FAIs tem sido repetidamente referidas como uma das maiores causas de mortes relacionadas ao sistema de distribuição de energia brasileiro, visto que pessoas podem ser expostas ao risco de choque elétrico. Além disso, é provável a existência de danos às propriedades e equipamentos, uma vez que o calor gerado pelo arco elétrico nesta situação pode causar a combustão dos materiais utilizados em sua fabricação. Este tipo de falta ainda afeta os índices de qualidade da energia elétrica entregue aos consumidores, já que devido ao rompimento do condutor, interrompem o fornecimento de energia, aumentando os índices de continuidade do serviço de concessionárias de energia elétrica. Em sistemas de distribuição de energia elétrica, as FAIs ocorrem com maior frequência do que nos sistemas de geração e transmissão, por esses estarem situados em áreas urbanas com condutores nus e aéreos suscetíveis ao contato com árvores, objetos estranhos, rompimento ou vandalismo (MORETO, 2005).

Com isto, a detecção deste tipo de falta só será realizada por dispositivos de proteção que possuam implementada a função específica capaz de reconhecer as características intrínsecas do defeito em questão. Com o intuito de diminuir o tempo em que o condutor rompido permanece energizado e conseqüentemente os riscos atribuídos a ele, diversas pesquisas vêm sendo realizadas a fim de desenvolver técnicas para detecção de faltas de alta impedância.

Nesse contexto, com o advento dos relés numéricos, torna-se essencial o desenvolvimento de metodologias que sejam capazes de detectar FAIs, de modo que, aplicadas em relés de proteção, essas técnicas auxiliem os esquemas de proteção no desligamento de linhas vivas em contato com o solo. Geralmente, as metodologias existentes empregam técnicas computacionais para processamento

de sinais, extraindo componentes harmônicas ou de sequência negativa para determinação da ocorrência de uma falta de alta impedância. Dada a importância da detecção das FAIs, é de grande relevância testar, através de modelamento de FAIS, um modelo de função para detecção das mesmas.

1.1 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

A rede de distribuição de energia elétrica está suscetível a faltas causadas por falhas de equipamentos, contato entre animais e objetos em partes vivas, queimadas, colisões, fadiga de materiais, fenômenos naturais, entre outros. Uma classe especial de faltas que podem ocorrer são as chamadas faltas de alta impedância (FAIs). Recebe esse nome pelo fato de que este tipo de falta geralmente apresenta um alto valor de resistência no ponto de falta. Portanto, a corrente de falta tem uma magnitude menor em comparação com a corrente gerada por faltas sólidas (MORETO, 2005).

Devido às suas características, a presença de FAIs pode não ser detectada nos sinais de tensão e corrente utilizados pelos dispositivos de proteção em sistemas de distribuição elétrica. Adicionalmente, as correntes de baixa magnitude produzidas pelas FAIs podem fazer com que sua presença seja confundida com aumentos de carga ou comutação de bancos de capacitores no sistema (FARIAS, 2017).

Como resultado, os sistemas de proteção podem falhar em eliminar adequadamente tais deficiências, resultando em riscos para pessoas e animais, incêndios e danos materiais aos consumidores e sistemas. Esses distúrbios reduzem os indicadores de qualidade da energia fornecida pelas concessionárias e aumentam seus custos operacionais. Em virtude disso, é proposto a análise da função *sensitive ground fault* (SGF) de um relé de proteção disposto na rede de distribuição.

1.2 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral analisar a função SGF, através da simulação e ajustes da função de proteção modelada, para atuação em FAIs originadas de condutores rompidos que toquem diferentes tipos de solo e que

geram curto-circuito monofásico-terra, em redes de distribuição de média tensão.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

De forma a atender o objetivo geral, os objetivos específicos deste projeto são:

- I. Modelar um sistema de distribuição de média tensão, por meio de uma ferramenta computacional;
- II. Modelar e simular computacionalmente o comportamento de uma FAI;
- III. Elaborar e coletar um conjunto de situações de FAI, em solos comuns de áreas urbanas, sobre o sistema de distribuição modelado;
- IV. Modelar e simular, através de ferramenta computacional, um relé com função SGF e fazer seu ajuste para detecção do conjunto de faltas obtidos nas simulações de FAI.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em 5 capítulos. No capítulo 1, é feita uma introdução sobre o tema abordado, a justificativa do trabalho e os objetivos a serem alcançados.

No capítulo 2, é feita uma abordagem sobre a função SGF inserida em relé de proteção para detecção de faltas de alta impedância. Também é feita uma explanação sobre o sistema de distribuição de energia elétrica em média tensão e o estudo de curtos-circuitos, suas componentes simétricas e Teorema de Fortescue.

No capítulo 3 é apresentada a metodologia proposta para o desenvolvimento deste trabalho, apresentando os modelos a serem utilizados e os estudos de caso.

O capítulo 4 apresenta os resultados encontrados através da metodologia das simulações das FAIs e da função SGF do relé de proteção. Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões, as contribuições deste estudo e propostas de trabalhos futuros.

De acordo com Kagan (2005), a rede de distribuição é a etapa final do SEP (Sistema Elétrico de Potência) e tem como finalidade distribuir a energia elétrica gerada pela usina para a população em geral. A distribuição de energia possui características muito diferentes das redes de transmissão, como cargas diferenciadas, topologias radiais, múltiplas interconexões e, na maioria das vezes, ausência de transposição.

O sistema de distribuição inicia após uma subestação de distribuição alimentada por uma ou mais linhas de transmissão. Em alguns casos, as subestações de distribuição são alimentadas diretamente por linhas de transmissão sem sistemas de subtransmissão. Cada subestação de distribuição fornecerá energia para uma ou mais redes primárias de distribuição (KERSTING, 2002).

Os sistemas ditos de subtransmissão contam com níveis de tensão tais como 34,5 kV, 69 kV, 88 kV e 138 kV e alimentam subestações de distribuição, cujos alimentadores primários de saída operam usualmente em níveis de 13,8 kV. Junto aos pequenos consumidores existe uma outra redução do nível de tensão para valores entre 110 V e 440 V, na qual operam os alimentadores secundários (EEL-USP, s.d.). Na Tabela 1 estão apresentadas as tensões padronizadas de cada subsistema do SEP.

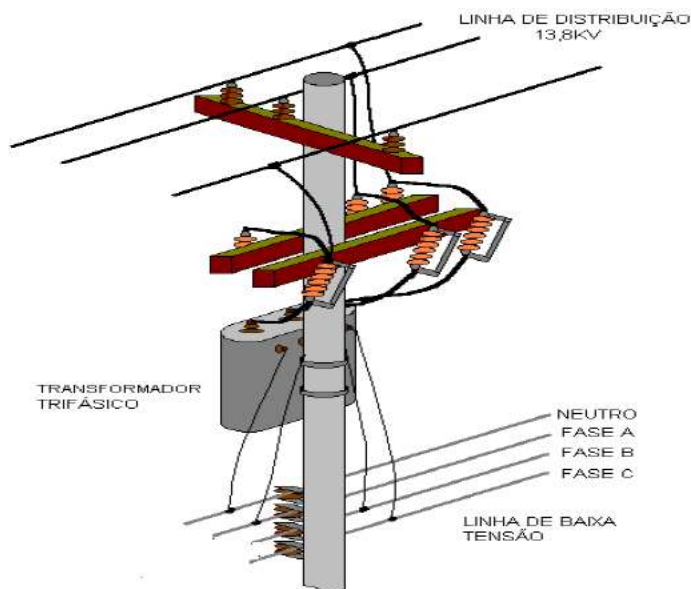
Tabela 1 – Padrão de tensões em SEP

Tensão [kV]	Campo de aplicação
0,220/0,127	Distribuição secundária (BT)
0,380/0,220	
13,8	Distribuição primária (MT)
34,5	
34,5	Subtransmissão (AT)
69,0	
138,0	Transmissão
138,0	
230,0	
345,0	
500,0	

Fonte: Adaptado de Kagan, Oliveira e Robba (2010).

As redes com tensão nominal entre 1 kV e 69 kV são denominadas redes de média tensão (MT) (ou de tensão primária) e os sistemas com tensões abaixo de 1 kV formam as redes de baixa tensão (BT) (ou de tensão secundária). Para fins de estudo, neste trabalho será abordada somente redes de média tensão. A Figura 2 exemplifica a disposição das redes no poste.

Figura 2 – Disposição das redes de distribuição no poste.



Fonte: Pereira (2000).

2.2.1 Redes de Distribuição Primária

Segundo Kagan, Oliveira e Robba (2010), a rede de distribuição primária é responsável pelo fornecimento de energia aos consumidores primários, como complexos industriais e comerciais de médio porte, e pelos transformadores de distribuição que abastecem a rede secundária. Estas redes podem ser aéreas ou subterrâneas, sendo as redes aéreas as mais utilizadas devido aos seus custos reduzidos de manutenção e instalação. As redes subterrâneas possuem alto custo e são utilizadas onde há maior densidade de carga ou existem restrições paisagísticas (KAGAN; OLIVEIRA e ROBBA, 2010).

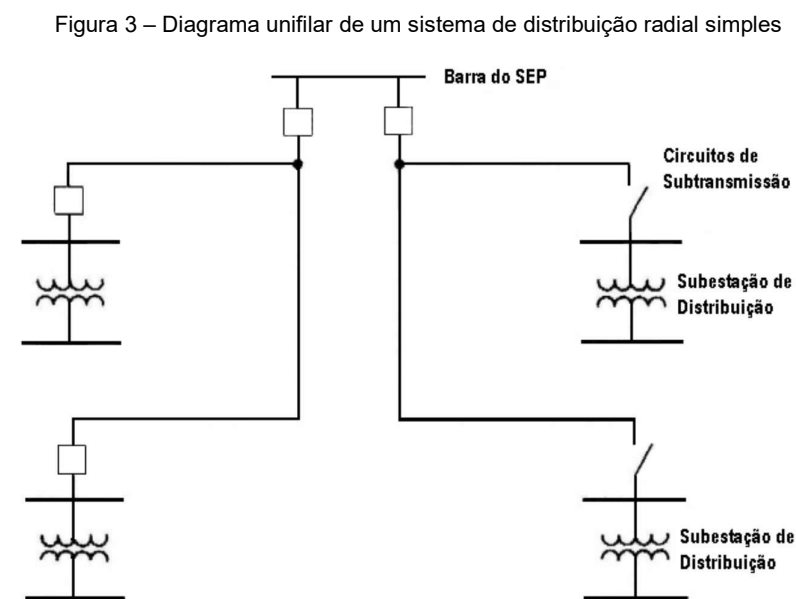
De acordo com Leão (2009), na rede primária de distribuição, basicamente são empregadas duas topologias: Radial ou Anel. Podem ainda ser subdivididas para a topologia Radial, sendo Radial simples, com seccionamento ou com

recurso. Com a topologia Anel, pode operar-se tanto com os alimentadores em anel aberto quanto fechado. As redes radiais são tipicamente utilizadas em redes aéreas de distribuição primária, onde a rede que deriva da subestação atende a um ou mais transformadores de distribuição, e o fluxo de potência apresenta uma única direção da subestação para o consumidor (COPEL, 1999).

2.2.1.1 Rede Radial

As redes radiais são baseadas em um ponto de alimentação e linhas que se ramificam sem se encontrar em um ponto comum. Esta topologia tem a menor confiabilidade e menor custo inicial e deve ser usada para distribuição. Se o cliente/consumidor não produz eletricidade, o sentido de transferência de energia é do ponto de produção para o ponto de carga/consumo, ou seja, existe apenas um sentido (FERREIRA, 2018 apud PAIVA, 2007).

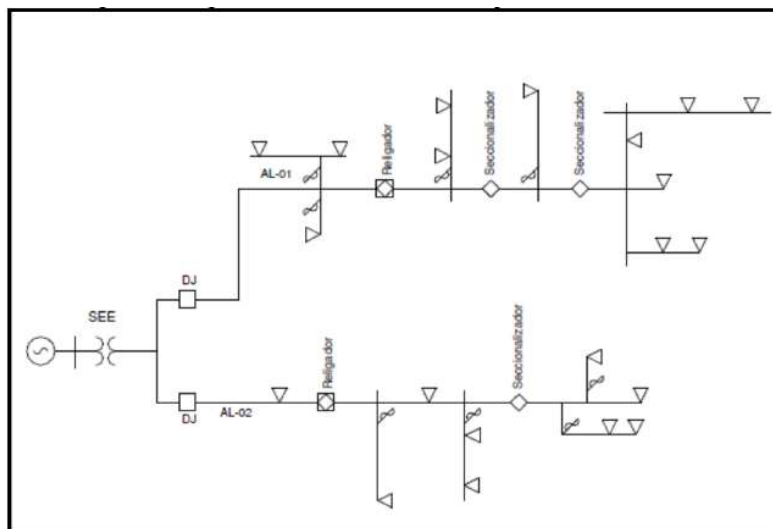
Nessa topologia, as proteções apresentam uma maior simplicidade de implementação, sendo o defeito alimentado e propagado em apenas num único sentido e a partir de um único ponto, havendo deste modo maior facilidade de exploração. A Figura 3 apresenta o diagrama da rede de distribuição radial simples.



Fonte: Leão (2009).

A Figura 4 apresenta o diagrama da rede de distribuição radial com seccionamento.

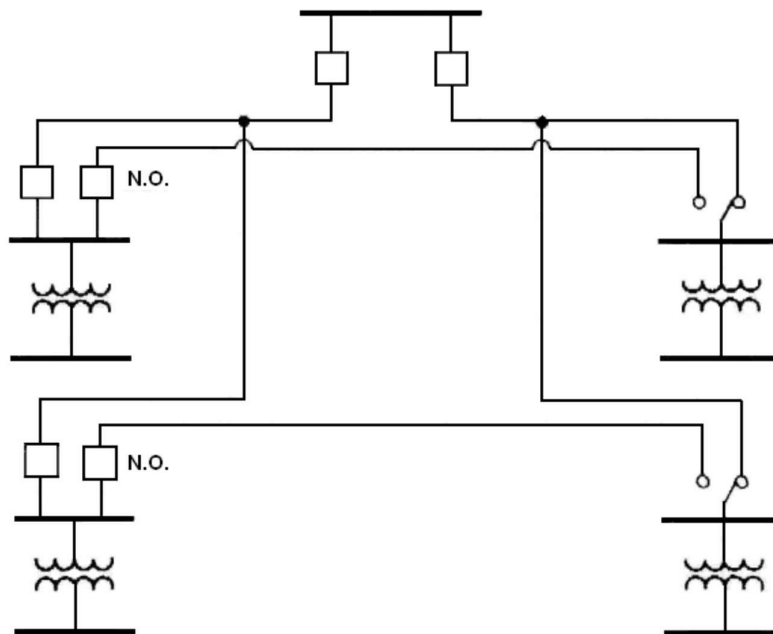
Figura 4 – Diagrama unifilar de um sistema de distribuição radial com seccionamento.



Fonte: Santos (2005).

O diagrama da rede de distribuição radial com recurso é mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Diagrama unifilar de um sistema de distribuição radial com recurso.



Fonte: Leão (2009).

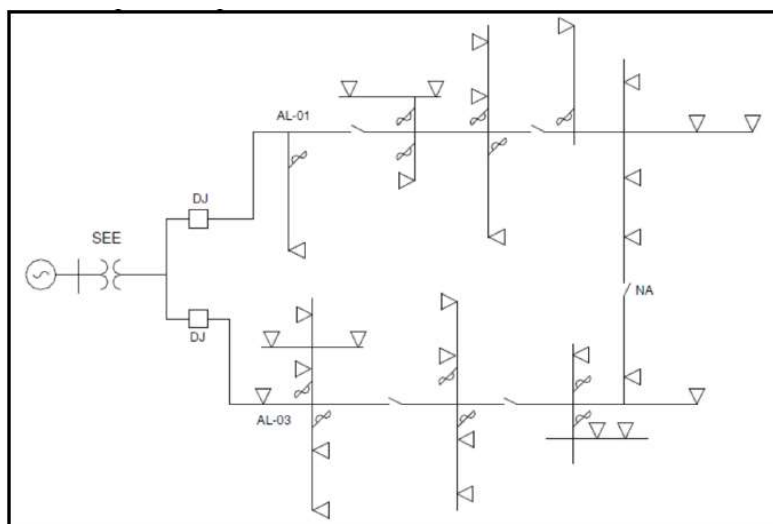
2.2.1.2 Rede em Anel

Redes em anel permitem alimentar um mesmo ponto de rede através de caminhos diferentes, geralmente explorada em regime de anel aberto. Esta topologia apresenta, em relação à rede radial, maior confiabilidade, porém possui custos elevados de implementação e de manutenção, além de cuidados adicionais com os sistemas de proteção (FERREIRA, 2018).

Em redes de distribuição de MT em áreas urbanas com elevada densidade de carga, essa é a topologia mais utilizada. As chaves desta topologia são de estado normalmente aberto e, em caso indisponibilidade da seção de linha, podem ser fechadas para garantir a continuidade do serviço (FERREIRA, 2018 apud PAIVA, 2007).

Na Figura 6 é apresentado o diagrama unifilar da rede de distribuição em anel.

Figura 6 – Diagrama unifilar da rede de distribuição em anel



Fonte: Santos (2005)

2.2.2 Condutores da rede de distribuição

Nas redes de distribuição de energia elétrica, os condutores utilizados podem ser de cobre ou de alumínio e podem ser nus, protegidos ou isolados, dependendo das características da rede. Kagan, Oliveira e Robba (2010) afirmam

que os condutores protegidos contam com uma capa de cobertura, a qual protege a rede contra contatos acidentais, porém não garantem a isolação da mesma.

Os condutores de alumínio protegido são classificados como CA, enquanto que os condutores de alumínio nus são classificados como condutores de alumínio com alma de aço, CAA, ou condutor de alumínio, CA. Segundo Kagan, Oliveira e Robba (2010), os condutores CAA contam com alma de aço para fornecer reforço mecânico, enquanto que os condutores CA não possuem nenhum reforço.

Kagan, Oliveira e Robba (2010) afirmam que os condutores CA são tipicamente utilizados nas redes de distribuição primária das áreas urbanas, devido a limitação do tamanho do vão entre os postes. Já nas redes rurais, são utilizados os condutores CA ou CAA, dependendo da característica da área onde será instalada a rede.

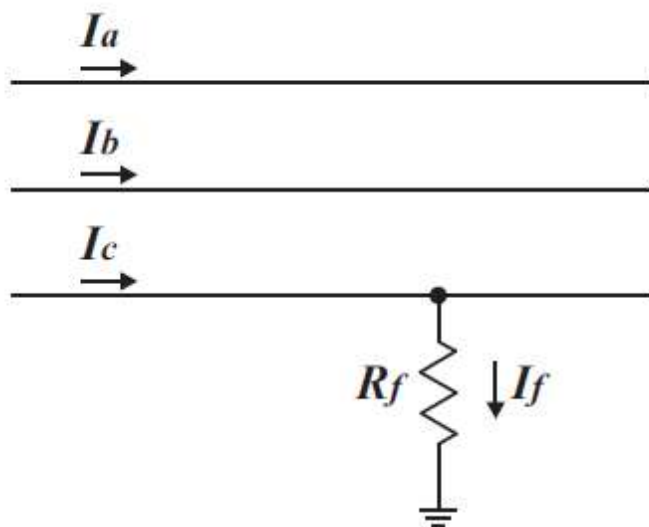
No Brasil, há uma predominância da rede primária com 3 condutores e, apesar de já existir uma quantidade de redes de distribuição construídas com condutores protegidos, a maioria das linhas de distribuição ainda é com condutores nus.

2.3 FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA (FAI)

Normalmente, uma FAI é resultado da queda ou contato de um condutor energizado do circuito da rede primária com uma superfície de alta resistividade, como árvores, vias públicas ou construções. FAIs são geralmente definidas como o contato elétrico indesejado de um condutor numa superfície não-condutora, o qual restringe a corrente de falta abaixo do nível detectável por relés convencionais (LEITE, 2017 apud TAO et al, 2008).

Na Figura 7 é mostrado o diagrama unifilar de uma falta de alta impedância do tipo fase-terra. O valor da resistência de falta R_f é desconhecido e depende principalmente das características do solo ou do objeto com o qual a fase faltosa entrar em contato.

Figura 7 - Diagrama unifilar de uma FAI fase-terra.



Fonte: Moreto (2005)

Sistemas de distribuição estão expostos a este tipo de falta e no caso de ocorrência, podem acarretar diagnósticos incorretos pela proteção convencional. A não detecção destas faltas pode expor a população ao risco de choques elétricos, comprometer a integridade dos equipamentos da rede e causar danos às propriedades (TEJADA, 2012 apud VICO et al, 2010).

Para as concessionárias, a falta de alta impedância com o rompimento de um condutor da rede de distribuição, com a consequente queda ao solo, é a mais preocupante (NAKAGOMI, 2006). Do ponto de vista jurídico, existem argumentos de pesquisa que apontam para a responsabilidade parcial ou total das concessionárias de energia elétrica em caso de eventual dano causado por faltas de alta impedância. Para prevenir acidentes, reduzir a duração dessas faltas na rede de distribuição e evitar danos tanto aos consumidores quanto as concessionárias, é necessário detectar e eliminar tais faltas o mais rápido possível. Conforme Vyshnavi e Prasad (2018), estima-se que entre 5% e 10% das falhas no sistema de distribuição são FAIs.

2.3.1 Características de faltas de alta impedância em redes de distribuição

A magnitude da corrente das FAI é dependente do tipo de superfície com que o condutor faz contato e do nível de tensão do sistema. Isto pode ser

visualizado na Tabela 2, onde são disponibilizados os valores medidos de corrente de FAI para diversos tipos de superfície (SHORT, 2004). Estes valores típicos de correntes foram obtidos para um sistema de distribuição com nível de tensão de 15 kV e pode ser observado que as correntes possuem valores inferiores a 100 ampères.

Tabela 2 – Magnitude das correntes de FAI.

Superfície	Corrente de Falta [A]
Asfalto seco	0
Concreto	0
Areia seca	0
Areia molhada	15
Gramado seco	20
Gramma seca	25
Gramado molhado	40
Gramma molhada	50
Concreto armado	75

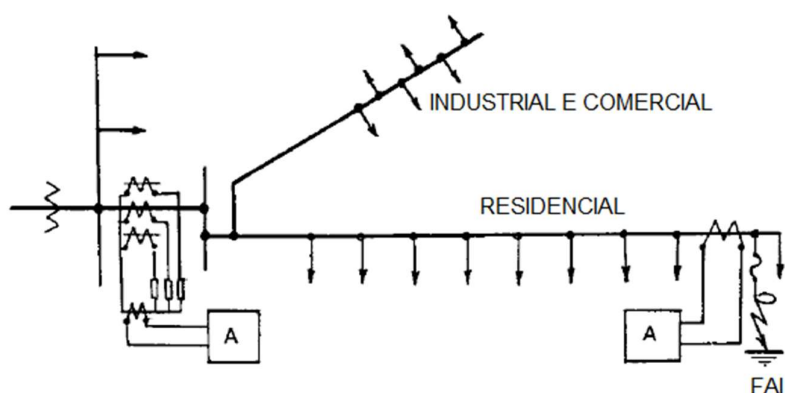
Fonte: adaptado de Short (2004).

Existem vários fatores que tornam o fluxo de corrente de faltas de alta impedância aleatório e dinâmico. Um arco ocorre quando um condutor energizado entra em contato com o solo assim a presença deste arco faz com que o condutor não permaneça parado no solo devido à presença de forças eletromagnéticas. A magnitude da corrente de falha varia à medida que a umidade da superfície do solo é reduzida em função do calor gerado pela falha e/ou à medida que o material de silício do solo é aquecido e se torna vitrificado. O solo também gera correntes de falha de diferentes magnitudes em diferentes estações e em diferentes áreas geográficas.

As características do arco produzido pela FAI foram investigadas, por Emanuel et al (1990), com base em dados experimentais que foram deliberadamente aplicados a faltas nas extremidades de alimentadores existentes e em operação, conforme mostrado na Figura 8. Os autores utilizaram a análise harmônica para caracterizar o comportamento não linear do arco. Em condições normais de operação, o espectro produzido pela aplicação da FAI foi comparado

com o espectro medido na subestação ao longo de uma semana. Através desta comparação, determinaram que, para os alimentadores em estudo, as medições da 3ª harmônica da corrente de linha e da 2ª harmônica da corrente de neutro poderiam servir como indicador da presença de FAI. O ponto de medição (linha ou neutro) foi escolhido porque, em condições normais, a presença do segundo e terceiro componentes é menos importante nas correntes de neutro e de linha, respectivamente.

Figura 8 – Sistema de experimento de Emanuel et al.



Fonte: Emanuel et al (1990).

O arco elétrico presente nas FAIs é o responsável pela assimetria na corrente de falta em todos os ciclos durante a falta. Essa assimetria é traduzida em componentes de frequência distintas da fundamental e está relacionada a variação na resistência elétrica do arco elétrico e das superfícies durante a FAI.

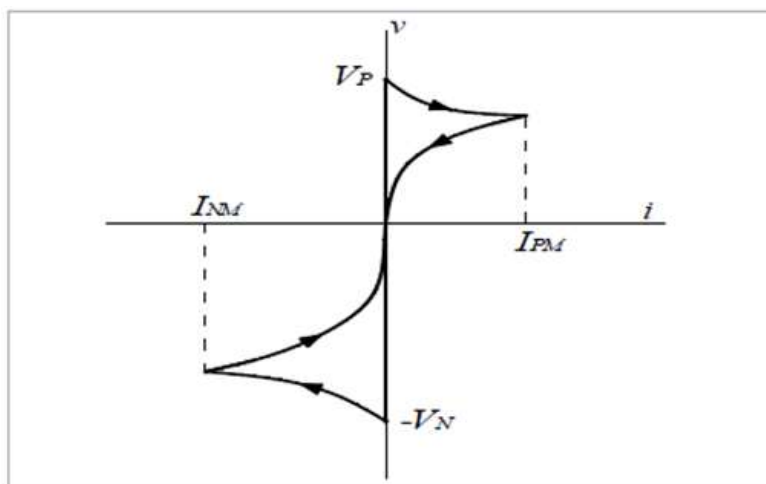
A física associada às FAIs produz o comportamento característico da tensão em função da corrente que se propaga no sistema de distribuição de energia elétrica (SDEE) a partir do ponto de falta. Essas características foram documentadas por pesquisadores como Emanuel et al (1990) e Nakagomi (2006), que determinaram as seguintes características:

- *Buildup*: a corrente de falta cresce de forma gradual;
- *Shoulder*: o *buildup* cessa por alguns ciclos e depois continua;
- Não linearidade: a curva característica tensão-corrente da FAI não é linear;

- Assimetria: a corrente de falta possui formas de onda diferentes para o semi-ciclo positivo e para o semi-ciclo negativo.

A curva característica tensão x corrente, obtida através dos experimentos, é mostrada na Figura 9. Na curva é possível observar a existência de uma tensão de ruptura dielétrica, valor a partir do qual a tensão começa a cair. Pode-se observar também que tanto a tensão quanto a corrente, realizam a passagem por zero ao mesmo tempo, comprovando o comportamento resistivo da FAI (SHORT, 2004).

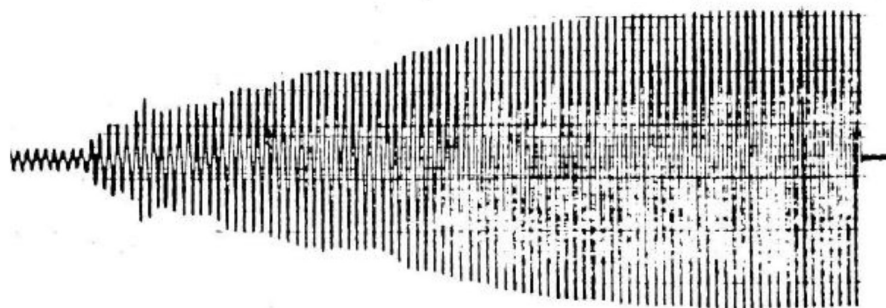
Figura 9 – Característica tensão-corrente de uma FAI.



Fonte: Emanuel et al (1990).

Nakagomi (2006) apud CESP (1985), apresenta um ensaio de faltas de alta impedância, onde foi lançando um cabo energizado a partir de um veículo de manutenção de linhas vivas, em diversos pontos ao redor de uma subestação. Na Figura 10 se pode observar a oscilografia do sinal de corrente do condutor que foi utilizado no ensaio. Nessa Figura, pode-se notar o aspecto do crescimento da envoltória da corrente de falta. Este comportamento, que é típico e repetido em quase todas as medições testadas, é conhecido como fase de *buildup* da corrente de falta de alta impedância. O tempo de duração da etapa de *buildup* está relacionado ao tempo de acomodação do condutor energizado no solo.

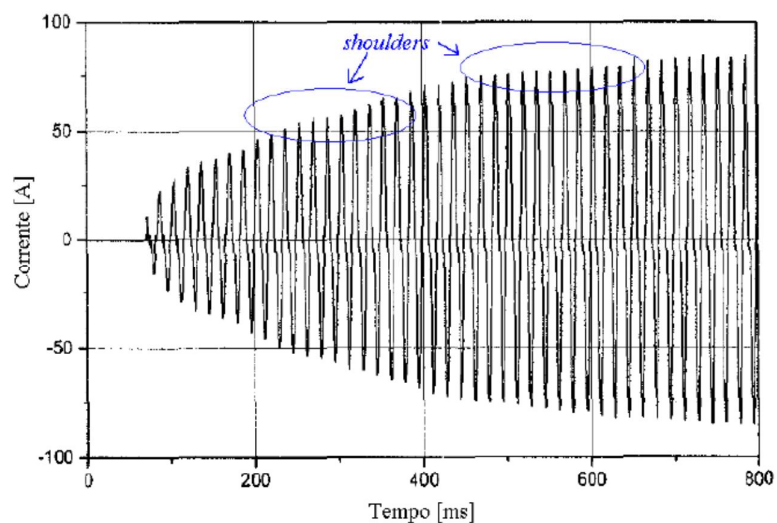
Figura 10 – Oscilografia da corrente no condutor utilizado no ensaio.



Fonte: Nakagomi (2006).

Durante a etapa de *buildup*, existem alguns trechos em que a amplitude permanece constante durante um determinado tempo antes de voltar a crescer. Esses trechos são denominados de *shoulders* e são mostrados na Figura 11.

Figura 11 – Shoulders.



Fonte: Nakagomi (2006).

2.3.2 Modelos de falta de alta impedância

A literatura apresenta modelos de falta de alta impedância que podem ser utilizados em ambientes controlados. Assim, estudos abordando os níveis de corrente e tensão em sistemas de distribuição podem ser simulados reproduzindo resultados próximos da realidade.

2.3.2.1 Modelo de resistência fixa

Este é um modelo simples de falta de alta impedância na qual a falta é representada por um resistor fixo conectado entre o ponto de falta e a terra. Quanto mais preciso for o modelo do sistema, mais próximos os dados calculados estarão dos dados medidos, ou seja, a modelagem da falta de alta impedância neste caso depende inteiramente da precisão de toda a modelagem do sistema (KOTLINSKI, 2013 apud LEE, 1985).

O modelo de resistência fixa não produz nenhum tipo de distorção na forma de onda da corrente. Conforme descrito anteriormente, em muitos casos de falta de alta impedância, há o aparecimento de arco elétrico que pode causar muita distorção na forma de onda da corrente deste tipo de falta, invalidando este modelo em muitos casos.

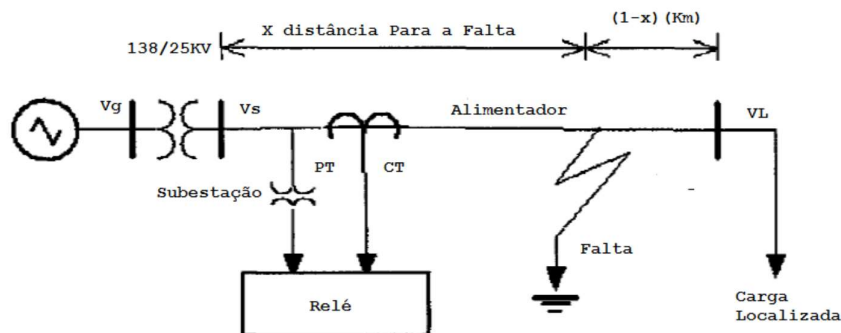
2.3.2.2 Modelo de combinação de impedâncias não-lineares

Este modelo é baseado no ciclo de tensão, ou seja, enquanto a tensão aumenta durante o semi-ciclo, positivo ou negativo, a impedância diminui. Deve-se notar que esta não é a aproximação ideal para o desenvolvimento de um modelo flexível, uma vez que se torna um modelo extremamente complexo para se configurar necessitando de muitas experiências e estudos sobre como modelar as não linearidades das impedâncias e como combinar tais impedâncias para que apresentem um resultado aceitável (KOTLINSKI, 2013 apud YU, 1994).

2.3.2.3 Modelo R_f e L_f

A Figura 12 apresenta um dos modelos mais utilizados para a simulação de falta de alta impedância. O modelo apresenta uma impedância de falta variável através de uma resistência de falta R_f e uma impedância de falta L_f .

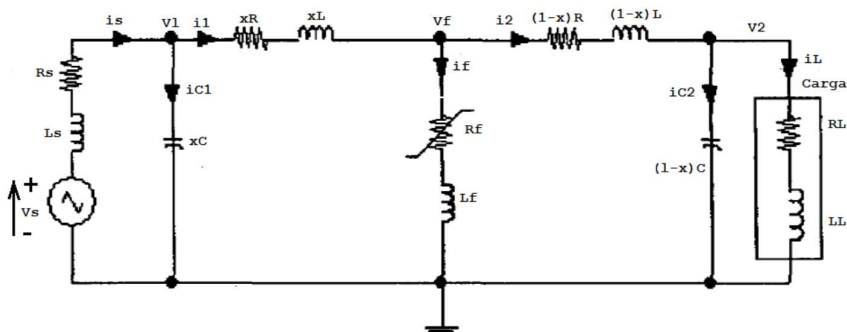
Figura 12 - Modelo R_f e L_f para simulação de falta de alta impedância



Fonte: Nakagomi (2006).

O circuito equivalente do modelo acima está mostrado na Figura 13. O circuito envolve informações específicas do carregamento do sistema, possibilitando os ajustes corretos de R_f e L_f .

Figura 13 - Circuito equivalente do modelo R_f e L_f .

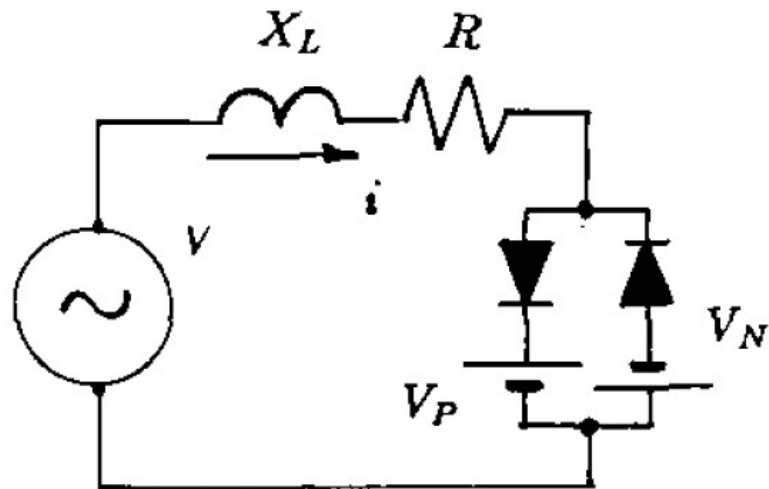


Fonte: Nakagomi (2006).

2.3.2.4 Modelo 2 diodos, 2 fontes CC e impedância

De acordo com Emanuel et al (1990), este modelo permite a realização de cálculos teóricos. O arco é modelado com a ajuda de duas fontes CC, V_p e V_n , conectadas em antiparalelo por meio de dois diodos. Utilizando-se $V_N > V_P$ pode-se calcular a amplitude de frequências harmônicas em função da diferença ($V_N - V_P$) e de $\tan\theta = X_L / R$. A Figura 14 apresenta o circuito do modelo em questão.

Figura 14 - Circuito modelo de FAI com arco.

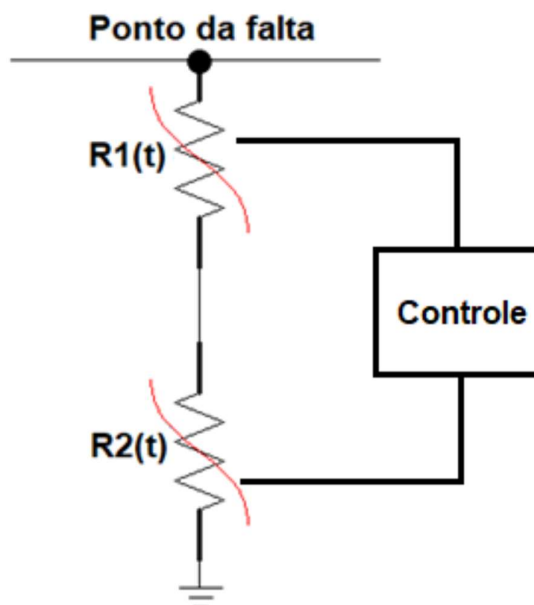


Fonte: Emanuel et al (1990).

2.3.2.5 Modelo de resistências não lineares

O modelo apresentado na Figura 15 foi proposto por Nam et al. (2001). Na configuração proposta, são utilizadas duas resistências não-lineares que variam seu valor através de uma função programável dependente do tempo. A resistência $R1(t)$ é responsável por representar as características de não-linearidade e assimetria da corrente de falta, e a resistência $R2(t)$ representa os efeitos de *buildup* e *shoulder* (MORETO, 2005). A conexão em série das resistências $R1(t)$ e $R2(t)$ permite com que sejam representadas todas as características das FAI já apresentadas, através de um único modelo para o defeito em questão.

Figura 15 - Modelo de FAI com resistências não lineares



Fonte: Nam et al. (2001).

2.3.3 Testes reais de falta de alta impedância

Esta seção descreve brevemente alguns dos trabalhos desenvolvidos em todo o mundo com testes reais de FAI. São apresentadas as características técnicas dos testes, bem como as conclusões obtidas no trabalho a partir dos registros oscilográficos.

1) Universidade de Texas A&M

Na década de 80, na Universidade de Texas A&M, 86 testes foram realizados e financiados pelo Electric Power Research Institute - EPRI (RUSSELL et al., 1982). Nos ensaios, foram considerados diferentes sistemas físicos e configurações elétricas, vários tipos de solo, diferentes comprimentos entre o ponto de falta e a subestação, vários tipos e quantidades de carga e banco de capacitores. Os testes foram realizados em tensão de 15 kV e os sinais foram registrados com uma taxa de 4096 amostras por ciclo de 60Hz. Do total de testes, 6 foram isolados por fusível, 15 testes (em areia e asfalto) não proporcionaram correntes detectáveis pelos instrumentos utilizados na época e, a partir dos outros 65 testes, foram apresentadas as seguintes conclusões:

- Presença de altas frequências no instante do início e final do arco;
- Os efeitos provocados pela FAI permanecem por vários ciclos o que não ocorre com a conexão de banco de capacitores;
- A duração da presença de altas frequências é um fator importante para diferenciar as FAIs de outros eventos normalmente presentes na rede elétrica;
- Grandes bancos de capacitores ligados em estrela aterrada desviam os sinais de alta frequência para a terra.

2) Schweitzer Engineering Laboratories (SEL)

Conforme Arias (2015), entre os anos de 2005 e 2008, a SEL desenvolveu testes em concessionárias da América do Norte e da América do Sul. As superfícies de contato utilizadas nos testes foram areia, terra, concreto, asfalto, cascalho, árvores e pneus, com tensões de teste de 13,8 kV e 13,2 kV. Com uma taxa de amostragem de 20kHz, as tensões e correntes foram coletadas em pontos distantes do local da falta. Para cada um dos testes foram registrados 1 minuto antes da falta e 3 minutos depois da falta. De acordo com Hou (2009), foram reportadas as seguintes conclusões:

- Os testes feitos em árvores mostraram variações pequenas no conteúdo de frequências harmônicas;
- Para os testes feitos em asfalto não foram registradas correntes de falta;
- Em testes com presença de arcos não foi observada muita atividade nas inter-harmônicas da corrente, mas foram geradas variações significativas nas harmônicas ímpares;
- Muitas das provas realizadas mostraram que não é possível reproduzir as mesmas características de FAI. Devido ao processo dinâmico, é possível detectar uma FAI num certo local, mas em outra época do ano, no mesmo local, existe a possibilidade de não detectá-la novamente.

3) Asea Brown Boveri (ABB)

De acordo com Arias (2015), o primeiro conjunto de testes, desenvolvido pela ABB, foi feito em laboratório entre os anos de 1998 e 2000, com 15 provas em 7 superfícies diferentes (grama congelada, grama úmida, solo, asfalto, cascalho, areia e concreto) totalizando 105 casos. Os casos tiveram uma duração de 5 segundos, foram feitos com uma tensão de 9 kV, medidos com uma taxa de amostragem de 20kHz, quantizados a 14 bits e acondicionados com o software LabView®. Esse mesmo sistema de medição das FAIs foi utilizado para obter as correntes de cargas não lineares, como TVs, lâmpadas fluorescentes, computadores, fontes de retificação, soldador de arco e controlador de motor monofásico, gerando-se assim 22 arquivos de cargas (ARIAS, 2015 apud DAS et al., 2007).

Já o segundo conjunto de testes, foi realizado em 2004 em um sistema de distribuição real isolado da concessionária TXU Huntington em Texas, em duas épocas distintas do ano (janeiro e setembro). Os testes foram feitos com tensões de 7,2 kV e 14,4 kV, em superfícies tais como; concreto, cascalho, asfalto, areia, árvores e combinação destas superfícies (ARIAS, 2015 apud CARPENTER et al., 2005).

As conclusões do conjunto de testes feitos, foram reportadas pelos documentos da ABB afirmando o seguinte:

- Superfícies tais como areia e cascalho sustentavam a integridade do cabo por vários minutos, gerando-se fumaça e os fusíveis de proteção só se fundiam quando a corrente achava um caminho para a terra;
- O concreto sustentava a integridade do cabo por vários minutos. Nesta superfície se produziam mais arcos visíveis do que em areia e cascalho. Em algumas ocasiões se produzia o derretimento do cabo;
- As árvores mantêm a integridade do cabo por mais de 13 minutos sem produzir ativação do fusível de proteção;
- Nos testes feitos em asfalto, o medidor não registrava nenhuma corrente de falta e não se apresentou geração de arcos elétricos.

2.4 CURTO-CIRCUITO

Um curto-circuito pode ser definido como uma conexão intencional ou acidental entre dois ou mais pontos que normalmente estão em diferentes potenciais elétricos. Como consequência, resulta uma corrente elétrica que pode atingir valores elevados, dependendo do tipo de curto-circuito. A esta corrente dá-se o nome de corrente de curto-circuito ou corrente de falta (MAMEDE, 2005).

O curto-circuito pode ser produzido dentro ou fora do equipamento, fazendo com que ele se deteriore. A maioria dos curtos-circuitos são ocasionados por falhas de isolamento do equipamento, que podem ser causadas por sobretensão de chaveamento, descarga elétrica, degradação do isolamento e conexão acidental de condutores através de objetos estranhos, como ferramentas, animais e galhos ou troncos de árvores.

As consequências desse fenômeno são correntes elevadas, muitas vezes muito superiores às verificadas em condições normais, que, se persistirem por muito tempo, podem levar ao aquecimento dos condutores e degradação irreversível do dispositivo, além de provocar esforços eletromecânicos entre as fases de elementos condutores dos equipamentos, como barramentos e enrolamentos. Outra consequência de um curto-circuito é uma mudança de tensão, que pode apresentar uma grande queda em algumas fases e um aumento em outras (MOREIRA, 2009).

O estudo das correntes de curto-circuito presentes em circuitos elétricos possui vários objetivos, como por exemplo:

- Dimensionamento de equipamentos da rede: condutores, isoladores e cabos devem suportar o aquecimento causado pela corrente máxima de curto-circuito até o momento da atuação da proteção, além disso, suportes, barramentos e enrolamentos devem suportar os esforços eletromecânicos causados pela máxima corrente de curto-circuito;
- Estudos de superação do disjuntor: o disjuntor deve ser capaz de interromper a corrente máxima do curto-circuito;
- Estudos de proteção: os níveis de corrente de curto-circuito calculados em diferentes pontos da rede são utilizados para parametrização dos relés;

- Dimensionamento de transformadores de corrente: Os níveis de corrente de curto-circuito devem ser considerados ao analisar a saturação destes dispositivos.

2.4.1 Tipos de curto circuito

Os tipos de curto-circuito podem ser classificados conforme pode ser visto na Tabela 3.

Tabela 3 - Tipos de curto-circuito

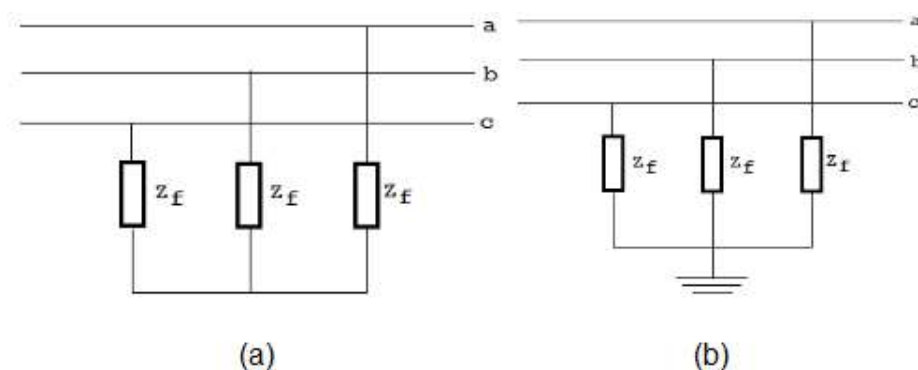
Identificação	Característica
Trifásico	Entre as três fase A, B e C
	Entre as três fase A, B, C e terra
Monofásico	Entre a fase A e terra
	Entre a fase B e terra
	Entre a fase C e terra
Bifásico	Entre as fases A e B
	Entre as fases A e C
	Entre as fases B e C
	Entre as fases A, B e terra
	Entre as fases A, C e terra
	Entre as fases B, C e terra

Fonte: LOPES (2009).

2.4.1.1 Curto-circuito trifásico

O curto-circuito que se dá entre as três fases é conhecido como curto-circuito trifásico. Observa-se que as três fases podem ser levadas a terra por meio de uma impedância, conhecida como impedância de falta Z_f . O curto-circuito trifásico pode acontecer entre as três fases, como demonstrado na Figura 16(a), ou entre as três fases e a terra, conforme Figura 16(b).

Figura 16 - Curto-circuito trifásico

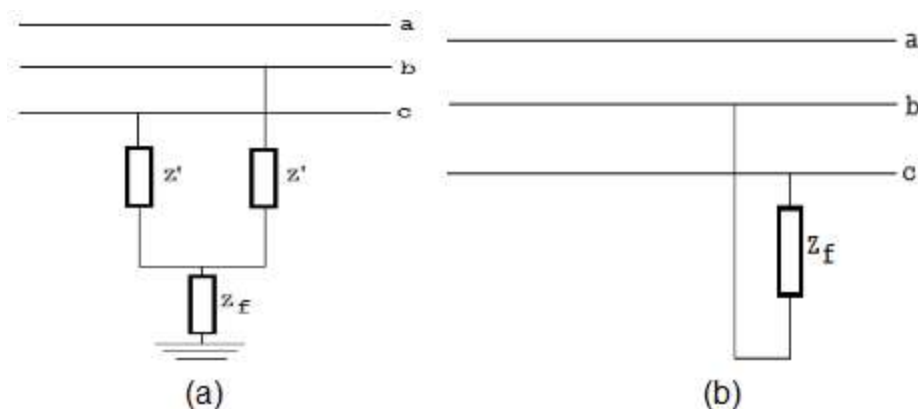


Fonte: LOPES (2009).

2.4.1.2 Curto-circuito bifásico

O curto-circuito bifásico é aquele que acontece entre duas fases e a terra, conforme Figura 17(a), ou somente entre duas fases, conforme Figura 17(b). A impedância de falta entre as fases é denotada por Z' e a impedância de falta como Z_f .

Figura 17 - Curto-circuito bifásico



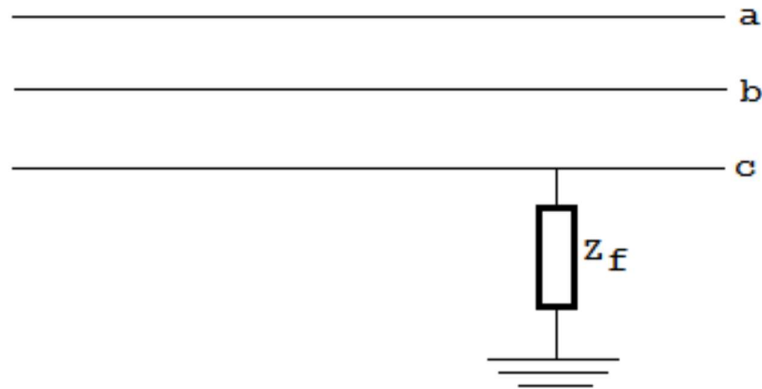
Fonte: LOPES (2009).

2.4.1.3 Curto-circuito monofásico

O curto-circuito entre uma fase a terra é conhecido como curto-circuito monofásico. A Figura 18 mostra do diagrama de um curto-monofásico e, como nos casos anteriores, Z_f denota impedância de falta. O curto-circuito monofásico à terra

é o mais frequente, em contrapartida, pela própria natureza física dos curtos-circuitos, o trifásico é o mais raro (KINDERMANN, 1997).

Figura 18 - Curto-circuito monofásico



Fonte: LOPES (2009).

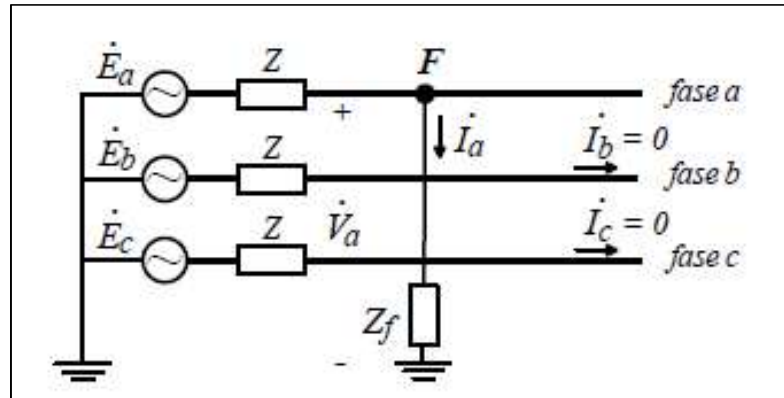
2.4.2 Equacionamento de curto-circuito

O objetivo principal deste trabalho é o estudo dos curtos-circuitos fase-terra e bifásico-terra. O equacionamento das outras faltas que podem acontecer em um sistema de distribuição, não será abordado.

2.4.2.1 Análise do curto-circuito fase-terra por Fortescue

O curto-circuito fase-terra é demonstrado na sequência a seguir, através do Teorema de Fortescue, utilizando como referência o circuito da Figura 19. Na Figura, o curto está representado na fase "a".

Figura 19 - Curto-circuito fase "a" - terra



Fonte: Vargas (2018).

Ao apresentar o curto-circuito na fase "a", pode-se determinar conforme equação 1.

$$\dot{I}_b = \dot{I}_c = 0 \quad (1)$$

Fazendo uso dos dados da equação 1 na equação 2, seguindo através das equações 3, 4, 5 e 6 é obtido a constatação da equação 7 (KINDERMANN, 1997).

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\dot{I}_{a0} = \frac{1}{3} \cdot [(1 \cdot \dot{I}_a) + (1 \cdot 0) + (1 \cdot 0)] = \frac{1}{3} \cdot \dot{I}_a \quad (4)$$

$$\dot{I}_{a1} = \frac{1}{3} \cdot [(1 \cdot \dot{I}_a) + (1|120^\circ \cdot 0) + (1|240^\circ \cdot 0)] = \frac{1}{3} \cdot \dot{I}_a \quad (5)$$

$$\dot{I}_{a2} = \frac{1}{3} \cdot [(1 \cdot \dot{I}_a) + (1|240^\circ \cdot 0) + (1|120^\circ \cdot 0)] = \frac{1}{3} \cdot \dot{I}_a \quad (6)$$

$$\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2} = \frac{1}{3} \cdot \dot{I}_a \quad (7)$$

Levando em consideração a sequência das componentes de tensão, conforme a equação 8, considerando V_f a tensão antes da falta, Z_{a0} , Z_{a1} e Z_{a2} são as componentes de sequência da impedância da linha. Para um sistema balanceado, pode-se escrever que E_{a0} será igual a E_{a2} e ambas iguais a zero e E_{a1} será igual à tensão antes da falta. Partindo da equação 9 e dando sequência através das equações 10, 11 e 12, a equação 13 pode ser determinada da seguinte forma (KINDERMANN, 1997):

$$\begin{cases} \dot{V}_{a0} = \dot{E}_{a0} - Z_{a0} \cdot \dot{I}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} = \dot{E}_{a1} - Z_{a1} \cdot \dot{I}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} = \dot{E}_{a2} - Z_{a2} \cdot \dot{I}_{a2} \end{cases} \quad (8)$$

$$\dot{V}_a = \dot{V}_{a0} + \dot{V}_{a1} + \dot{V}_{a2} \quad (9)$$

$$Z_f \cdot \dot{I}_a = -Z_{a0} \cdot \dot{I}_{a0} + \dot{V}_f - Z_{a1} \cdot \dot{I}_{a1} - Z_{a2} \cdot \dot{I}_{a2} \quad (10)$$

$$Z_f \cdot \dot{I}_a = \dot{V}_f - \frac{\dot{I}_a}{3} \cdot (Z_{a0} + Z_{a1} + Z_{a2}) \quad (11)$$

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{V}_f}{\frac{1}{3}(Z_{a0} + Z_{a1} + Z_{a2}) + Z_f} \quad (12)$$

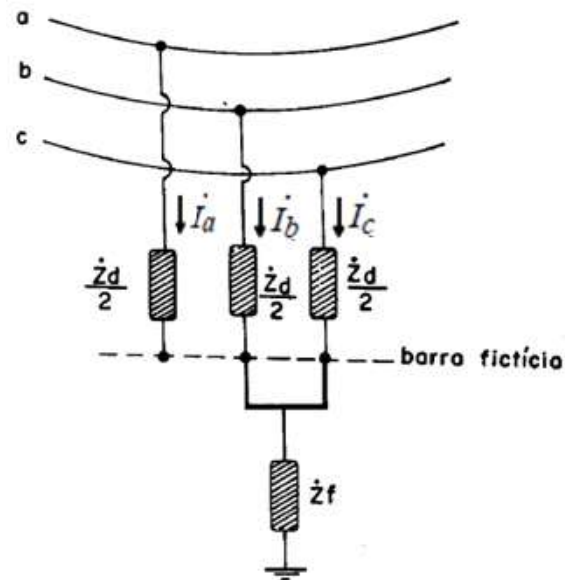
$$\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2} = \frac{\dot{V}_f}{(Z_{a0} + Z_{a1} + Z_{a2}) + 3Z_f} \quad (13)$$

Portanto, para determinação da corrente de curto-circuito monofásico, se faz necessário conhecer as sequências 0, 1 e 2 da linha, a impedância da falta e a tensão no instante anterior da ocorrência da falta.

2.4.2.2 Análise do curto-circuito bifásico-terra por Fortescue

O curto-circuito bifásico-terra é demonstrado na sequência a seguir, através do Teorema de Fortescue, utilizando como referência o circuito da Figura 20. O curto está representado entre as fases “b”, “c” e a terra.

Figura 20 - Curto-circuito fases "b e c" - terra



Fonte: Kindermann (1997).

Analisando o curto-circuito da Figura 20, pode-se determinar as equações 14, 15 e 16.

$$\dot{I}_a = 0 \quad (14)$$

$$\dot{V}_b = Z_f \cdot \dot{I}_b + Z_d \cdot (\dot{I}_b + \dot{I}_c) \quad (15)$$

$$\dot{V}_c = Z_f \cdot \dot{I}_c + Z_d \cdot (\dot{I}_b + \dot{I}_c) \quad (16)$$

Alterando os dados da equação 14 na equação 17, seguindo através das equações 18 e 19, obtém-se a equação 20.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\dot{I}_a = 0 = \dot{I}_{a0} + \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} \quad (18)$$

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = \dot{I}_{a1} \cdot (\alpha^2 + \alpha + 1) + \dot{I}_{a2} \cdot (\alpha^2 + \alpha + 1) + 3\dot{I}_{a0} \quad (19)$$

$$\dot{I}_b + \dot{I}_c = 3\dot{I}_{a0} \quad (20)$$

Reescrevendo as equações 15 e 16 em componentes simétricas, obtém-se as equações 21 e 22.

$$\dot{V}_b = \dot{V}_{a0} + \alpha^2 \cdot \dot{V}_{a1} + \alpha \cdot \dot{V}_{a2} = Z_f \cdot (\dot{I}_{a0} + \alpha^2 \cdot \dot{I}_{a1} + \alpha \cdot \dot{I}_{a2}) + 3 \cdot Z_d \cdot \dot{I}_{a0} \quad (21)$$

$$\dot{V}_c = \dot{V}_{a0} + \alpha \cdot \dot{V}_{a1} + \alpha^2 \cdot \dot{V}_{a2} = Z_f \cdot (\dot{I}_{a0} + \alpha \cdot \dot{I}_{a1} + \alpha^2 \cdot \dot{I}_{a2}) + 3 \cdot Z_d \cdot \dot{I}_{a0} \quad (22)$$

Subtraindo a equação 22 da equação 21, encontra-se a equação 23.

$$(\dot{V}_{a1} - Z_f \cdot \dot{I}_{a1}) = (\dot{V}_{a2} - Z_f \cdot \dot{I}_{a2}) \quad (23)$$

Isolando os termos de sequência zero da equação 21, obtém-se a equação 24.

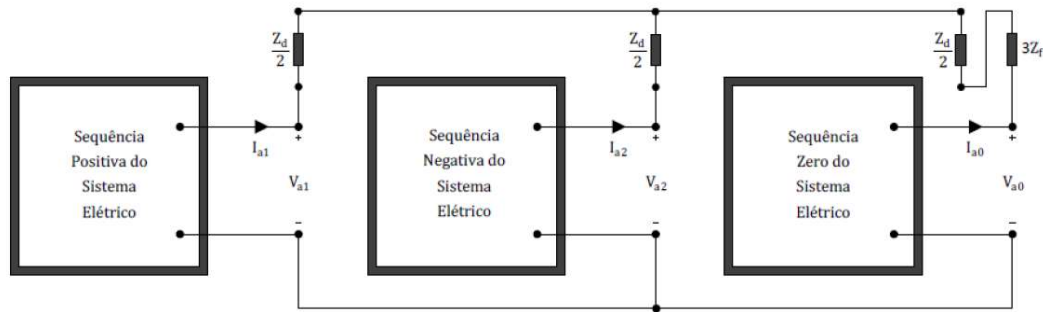
$$\dot{V}_{a0} - \dot{I}_{a0} \cdot (Z_f + 3 \cdot Z_d) = -\alpha^2 \cdot (\dot{V}_{a1} - Z_f \cdot \dot{I}_{a1}) - \alpha \cdot (\dot{V}_{a2} - Z_f \cdot \dot{I}_{a2}) \quad (24)$$

Alterando os dados da equação 24 na equação 23, encontra-se a equação 25.

$$\dot{V}_{a0} - \dot{I}_{a0} \cdot (Z_f + 3 \cdot Z_d) = \dot{V}_{a1} - Z_f \cdot \dot{I}_{a1} = \dot{V}_{a2} - Z_f \cdot \dot{I}_{a2} \quad (25)$$

As equações 18 e 25, descrevem comportamento de elementos ligados em paralelo, com soma de correntes iguais a 0 e igualdade entre tensões, resultando no diagrama da Figura 21.

Figura 21 - Diagrama de sequência do curto-circuito bifásico-terra



Fonte: Kindermann (1997).

Através da Figura 21 define-se a corrente de sequência positiva, mostrada na equação 26.

$$\dot{I}_{a1} = \frac{E_1}{Z_1 + Z_f + (Z_0 + 3Z_d + Z_f) / (Z_f + Z_2)} \quad (26)$$

Considerando as impedâncias, de falta (Z_f) e entre fases (Z_d), iguais a 0, a corrente de sequência positiva é obtida pela equação 27.

$$\dot{I}_{a1} = \frac{E_1}{Z_1 + Z_0 // Z_2} \quad (27)$$

As equações 28 e 29 apresentam, respectivamente, as correntes de sequência negativa (I_{a2}) e de sequência zero (I_{a0}), que são extraídas através do divisor de corrente.

$$\dot{I}_{a2} = -\dot{I}_{a1} \cdot \frac{Z_2}{(Z_0 + Z_2)} \quad (28)$$

$$\dot{I}_{a0} = -\dot{I}_{a1} \cdot \frac{Z_0}{(Z_0 + Z_2)} \quad (29)$$

Levando em consideração $Z_f = 0$ e $Z_d = 0$ na equação 25 e considerando a matriz descrita na equação 30, tem-se a equação 31.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\dot{V}_{a0} = \dot{V}_{a1} = \dot{V}_{a2} = \frac{1}{3} \cdot \dot{V}_a \quad (31)$$

Consequentemente, $V_b = 0$ e $V_c = 0$.

2.5 PROTEÇÕES DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

Independentemente da carga e da extensão, quando uma rede de distribuição está funcionando corretamente, todas as partes devem ter algum tipo de proteção. Como a maioria dos alimentadores tem alguma flexibilidade no deslocamento de carga, todos os arranjos possíveis devem ser considerados no projeto de proteção para evitar situações em que a rede não esteja protegida.

Conforme Giquer (1998), para que a qualidade do fornecimento de energia elétrica ao consumidor seja mantida, os sistemas de proteção devem atender aos seguintes requisitos:

- Seletividade: Somente deve ser isolada a parte defeituosa do sistema, mantendo em serviço as demais partes;
- Rapidez: As sobrecorrentes geradas pela falta devem ser extintas no menor tempo possível, de modo a dificultar que o defeito interfira em outras partes do sistema;
- Sensibilidade: A proteção deve ser sensível aos defeitos que possam ocorrer no sistema;
- Segurança: A proteção não deve atuar de forma errônea em casos onde não houver falta, bem como deixar de atuar em casos faltosos;
- Economia: A implementação do sistema de proteção deve ser economicamente viável.

Sistemas de proteção adequados em redes de distribuição, seguindo técnicas e práticas recomendadas, proporcionam (JUNIOR, 2017):

- Redução nos desgastes dos materiais e equipamentos de redes, proporcionando maior vida útil aos mesmos;
- Redução dos custos de manutenção corretiva e melhor aplicação dos recursos de manutenções preventivas;
- Redução nos desligamentos acidentais;
- Maior segurança para o sistema elétrico, profissionais e a população;
- Melhoria da imagem da concessionária junto aos consumidores;
- Aumento de faturamento e venda de energia elétrica por parte das concessionárias;
- Redução do tempo de interrupções, isolando a menor parte possível do sistema em caso de alguma falta;
- Facilidade na busca e pesquisa de defeitos, com a implementação de equipamentos modernos com capacidade de armazenagem de dados, auxiliando a investigação de defeitos.

2.5.1 Equipamentos de proteção

O conhecimento dos equipamentos de proteção que constituem o sistema de proteção da rede de distribuição é essencial. Como o foco do trabalho está em uma função associada aos relés de proteção, apenas este equipamento será abordado neste subcapítulo.

2.5.1.1 Relés de proteção

A definição de relé feita pelo IEEE (2006) é: “um dispositivo elétrico projetado para responder a condições de entrada prescritas e que, após a ocorrência de condições específicas, causa operações de contato elétrico ou mudança abrupta nos circuitos elétricos associados”.

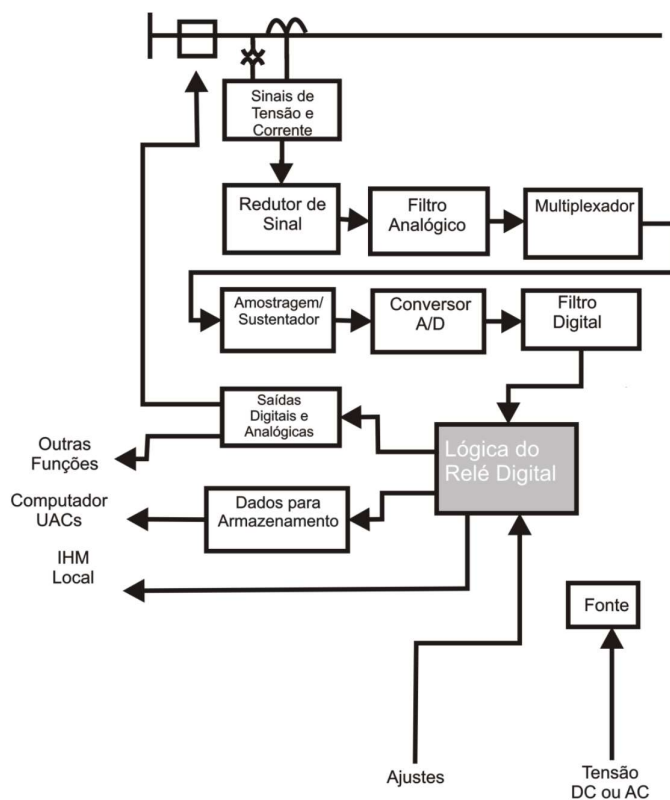
Por volta de 1930 surgiram os primeiros relés de proteção com tecnologia à base de componentes eletrônicos, utilizando semicondutores. Na década de 1980, com o desenvolvimento acelerado da microeletrônica, surgiram as primeiras

unidades de proteção utilizando a tecnologia digital (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2011).

Os relés são os principais e mais importantes dispositivos de um sistema de proteção, visto que são eles que atuam identificando o local e o tipo de falta, alertando o operador e promovendo a abertura de disjuntores para retirada do trecho defeituoso do sistema de operação (KINDERMANN, 2005), mantendo o restante do sistema operando normalmente.

Os relés de proteção digitais são gerenciados por sistemas microprocessados desenvolvidos especificamente para este fim. Nestes relés, os sinais de entrada das grandezas elétricas e os parâmetros de ajustes são controlados via software que processa a lógica de proteção através de um algoritmo. O relé digital funciona internamente associando várias lógicas de blocos, como pode ser visto na Figura 22.

Figura 22 - Unidades lógicas de um relé digital



Fonte: Kindermann (2005).

De acordo com Kindermann (2005), esses blocos realizam as seguintes

funções:

- Entrada Analógica: bloco inicial por onde entram os sinais analógicos de corrente e tensão provenientes do transformador de corrente (TC) e transformador de potencial (TP);
- Redutor de Sinal: onde é feita a adaptação dos sinais de entrada ao circuito do relé digital. Neste bloco, transformadores auxiliares produzem o desacoplamento físico entre os circuitos de entrada e de saída;
- Filtro Analógico: realiza uma filtragem dos sinais indesejados;
- Multiplexador: responsável pela multiplexação dos sinais de entrada;
- Amostragem e sustentação (*Sample and Hold*): preparação dos sinais analógicos em sinais de amostragem por ciclo para a conversão em sinais digitais;
- Conversão A/D: converte os sinais amostrados em sinais digitais;
- Filtro Digital: tem a função de estabilizar os sinais digitais;
- Lógica do relé: área de processamento do relé, a qual depende do algoritmo aplicado e da função de proteção desejada.
- Saídas digitais e analógicas: são os atuadores e são acionadas de acordo com o resultado da operação lógica do algoritmo do relé. Geralmente estão associadas a alarmes, controles, dados para supervisão, comando para outros relés e principalmente comando de abertura para disjuntores;
- Bloco de registro de eventos e oscilografia: responsável por armazenar os registros necessários para efetuar análise do desempenho da atuação da proteção e das condições do sistema durante a ocorrência da falta;
- Interface Homem-Máquina (IHM): interface gráfica para acesso à parametrização ou visualização das variáveis do relé. Pode estar presente diretamente no aparelho, através de um computador local ou de maneira remota.

Além de executarem as funções de proteção, os algoritmos utilizados nos relés digitais também podem exercer funções de medição e controle, permitindo ao usuário verificar valores eficazes de tensão e corrente do sistema diretamente no dispositivo de proteção e enviar comandos de abertura e fechamento para chaves seccionadoras. Outras vantagens agregadas ao uso dos relés digitais são (SILVA, 2012):

- Compactação, diminuindo os espaços ocupados nos painéis de proteção;
- Recebimento de sinais advindos de outros relés (bloqueio ou permissão);
- Maior flexibilidade de ajuste das funções de proteção em relação ao tempo, facilitando a coordenação da proteção;
- Ajustes diferenciados para defeitos, trifásico, bifásico e monofásicos;
- Utilização de vários grupos de ajustes que se adaptam automaticamente a mudanças na configuração do circuito;
- Possibilidade de emular qualquer relé eletromecânico;
- Possibilidade de utilizar mais de uma função de proteção em um único dispositivo.

2.5.1.1.1 Relés de sobrecorrente instantâneo/temporizado (Função 50/51)

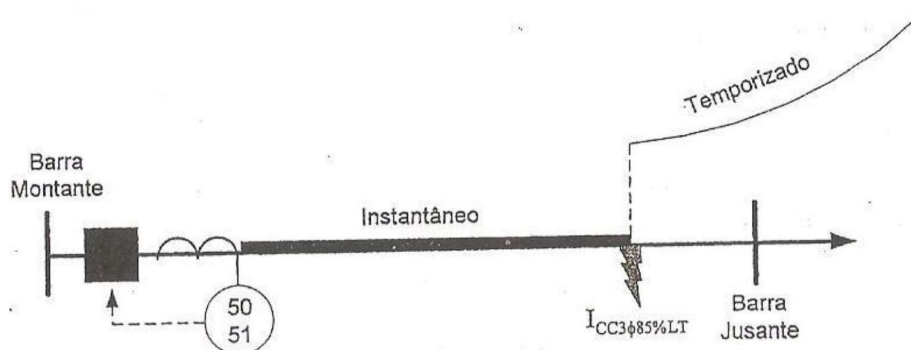
As funções de proteção 50/51, atuam quando detectadas correntes elevadas da rede através do $I_{Pick-up}$ do relé, abrindo o disjuntor da conexão. Normalmente utilizada quando o sistema precisa de operação com característica tempo X corrente controlada ou restringida por tensão, podendo fornecer proteção de sobrecorrente para curto-circuito trifásicos, bifásicos e fase-terra (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2016).

A aplicação correta dos relés de proteção de sobrecorrente exige o conhecimento da corrente de falta que circula por cada parte do sistema. Este relé permite a realização de uma operação de alta velocidade para curtos mais severos e ao mesmo tempo permite a realização da coordenação entre os relés adjacentes.

Geralmente, ajusta-se o elemento instantâneo para proteger apenas 85% da linha de distribuição. Este ajuste é realizado desta maneira para que a proteção instantânea não exceda o comprimento da linha garantindo seletividade (KINDERMANN, 2005).

Na Figura 23 é mostrado um exemplo de ajuste do relé de sobrecorrente temporizado com elemento instantâneo.

Figura 23 - Ajuste do relé de sobrecorrente



Fonte: Kindermann (2005).

2.5.1.1.2 Relés de sobrecorrente direcional (Função 67)

De acordo com Maezono (2014), a diferença entre uma função de sobrecorrente e uma função direcional de sobrecorrente (função 67) é a característica extra, associada à direção da corrente. A característica direcional se dá através da polarização de tensão, ou seja, a cada unidade de sobrecorrente está associada uma tensão de referência ou polarização (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2016).

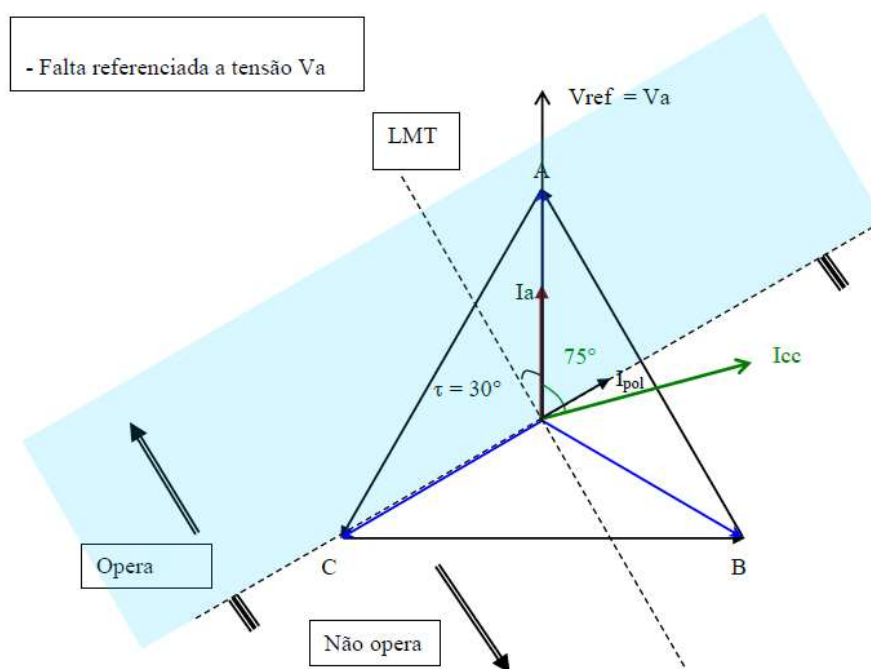
Esta função deve atuar apenas se duas condições forem satisfeitas: a intensidade da corrente passante deve estar acima do limite mínimo estabelecido e estar circulando em um determinado sentido.

Esta é uma característica fundamental para um esquema de proteção funcionar corretamente, pois, impondo a condição do fator direção, a facilidade para desligar o menor número dos componentes do sistema elétrico é maior, ou seja, isolar a falha, no menor tempo possível, garantindo uma boa sensibilidade e seletividade (MAEZONO, 2014).

A função de proteção 67, detecta faltas trifásicas, bifásicas e monofásicas,

porém isso pode requerer ajustes extremamente sensíveis que vão limitar o fluxo de potência reverso. O ajuste do relé direcional se assemelha ao do relé de sobrecorrente não direcional, podendo apresentar características instantânea, temporizada ou ambas no mesmo equipamento. O diagrama vetorial de um relé de sobrecorrente direcional é mostrado na Figura 24.

Figura 24 - Diagrama vetorial do relé direcional



Fonte: Lima (2021).

2.5.1.1.3 Relés com a função Sensitive Ground Fault (SGF)

A corrente de falta de alta impedância resultante de condutores caídos sobre terra gramada ou concreto molhado, pode ser menor do que os desequilíbrios de carga do sistema e a proteção de sobrecorrente de terra tradicional pode não diferenciar falhas de condutores caídos, de cargas monofásicas (HAYES, HOU e FISCHER, 2021). Para isso é necessário uma proteção SGF.

SGF é, como o nome sugere, mais sensível do que a proteção de falta à terra regular. Normalmente, o *pickup* estará na faixa de 5-10A, com atrasos mais longos do que a proteção de falta à terra padrão, na ordem de 1 segundo

(SCADAMINER, 2017). Algumas literaturas também nomeiam a função como falha à terra sensitiva ou *sensitive earth fault* (SEF).

Seu principal objetivo é detectar condutores aéreos caídos. Se um condutor cair em um solo extremamente seco, a impedância de falha pode ser muito alta e apenas uma pequena quantidade de corrente de sequência zero fluirá. Daí a necessidade de uma proteção de falta à terra mais sensível (SCADAMINER, 2017).

Entre o final dos anos 70 e início dos anos 80, A EPRI e a *Canadian Electricity Association* (CEA) dirigiram e publicaram os resultados de vários estudos sobre a detecção de falta à terra sensível. Estes estudos despertaram interesse no desenvolvimento de algoritmos visando especificamente a detecção de falhas de alta impedância. Como esperado, todos os algoritmos de detecção usam alguns sinais além da magnitude da corrente residual. Além disso, todos os algoritmos exploram uma ou várias assinaturas apresentadas pelos arcos elétricos que são comumente envolvidos em faltas de alta impedância. Para aprimorar a extração de assinatura de falhas de arco, os algoritmos de detecção normalmente usam técnicas de análise de dados e algoritmos de inteligência artificial (IA), incluindo decomposição de *wavelets*, redes neurais, estatísticas e sistemas especializados (HAYES, HOU e FISCHER, 2021).

Os algoritmos presentes em alguns dispositivos comerciais serão descritos na continuação.

1) ABB – REF550

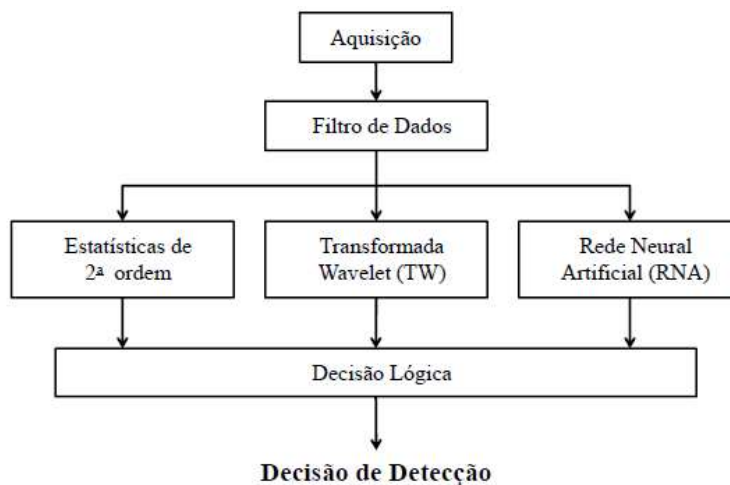
Neste relé da ABB, o sistema de detecção utiliza 3 algoritmos distintos, baseados na transformada de *wavelet*, redes neurais artificiais e estatísticas de ordem superior (ARIAS, 2015).

O algoritmo que utiliza a transformada de *wavelet*, calcula a energia do sinal e depois compara a energia calculada com um limiar preestabelecido para determinar a ocorrência de FAI. O algoritmo de detecção baseado em estatísticas de segunda ordem, calcula a energia do sinal filtrado utilizando integração de poliespectro (*integrated polyspectra*) em cada uma das correntes de fase. Após, a energia calculada é comparada com um valor limite para determinar se há ocorrência de FAI.

Já no algoritmo que utiliza redes neurais artificiais, são utilizadas duas redes neurais em paralelo. A primeira rede utiliza as amostras do sinal contidas numa janela de 3 ciclos e a segunda utiliza as componentes da transformada de Fourier do sinal contido na janela de 3 ciclos. As duas redes foram treinadas utilizando 600 casos (300 de FAI e 300 de conexão de carga monofásica não linear) e os desempenhos das redes foram avaliados utilizando 3600 casos (1800 de FAI e 1800 de conexão de carga monofásica não linear). A saída final é obtida somando as saídas das duas redes neurais (ARIAS, 2015).

A Figura 25 apresenta o diagrama de blocos do sistema de detecção da ABB.

Figura 25 - Diagrama de blocos do sistema de detecção da ABB

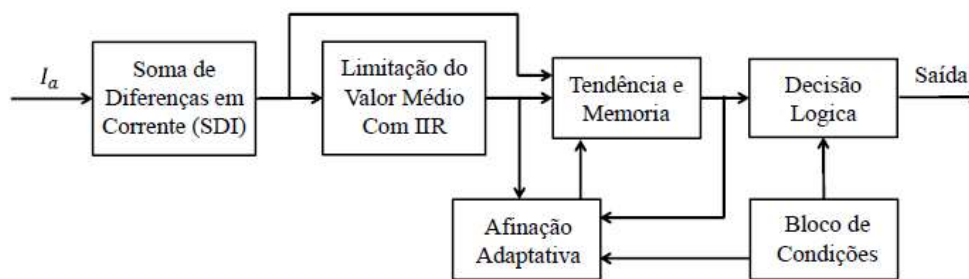


Fonte: Arias (2015).

2) SEL – SEL751

A tecnologia deste relé é baseada na de detecção de arcos elétricos cujo objetivo é incrementar a detecção de FAI tanto quanto for possível mantendo a segurança na detecção. A Figura 26 apresenta o diagrama de blocos do sistema de detecção deste relé.

Figura 26 - Diagrama de blocos do sistema de detecção da SEL



Fonte: adaptado de Hayes, Hou e Fischer (2021).

O algoritmo de detecção de alta impedância começa com a filtragem das energias inter-harmônicas totais das correntes de fase. Inter-harmônicos são componentes de sinal com frequências que não são tempos inteiros da frequência fundamental. O algoritmo então estabelece uma referência estável das energias inter-harmônicas com um filtro de resposta ao impulso infinito (IIR) que possui uma constante de tempo longa. O algoritmo então verifica a magnitude e o intervalo de tempo das mudanças incrementais dos inter-harmônicos para detectar a FAI (HAYES, HOU e FISCHER, 2021).

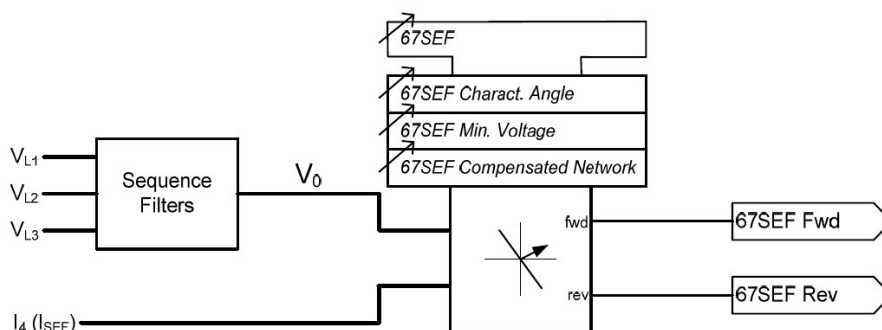
3) SIEMENS – 7SR11 e 7SR12 Argus

A corrente para os elementos de falha à terra sensíveis é medida diretamente através de uma entrada de corrente analógica dedicada. Os elementos SGF medem a corrente da frequência fundamental RMS (SIEMENS, 2017).

Nestes relés estão presentes as funções 67SEF, 51SEF e 50SEF, todas para proteção de corrente de falta à terra sensível.

Na proteção direcional de controle de falta à terra sensível (67SEF), o elemento direcional produz saídas de avanço e reversas para uso com os elementos SEF. Estas saídas podem ser mapeadas como controles para cada um dos elementos instantâneos e temporizados. A Figura 27 apresenta o diagrama lógico da função.

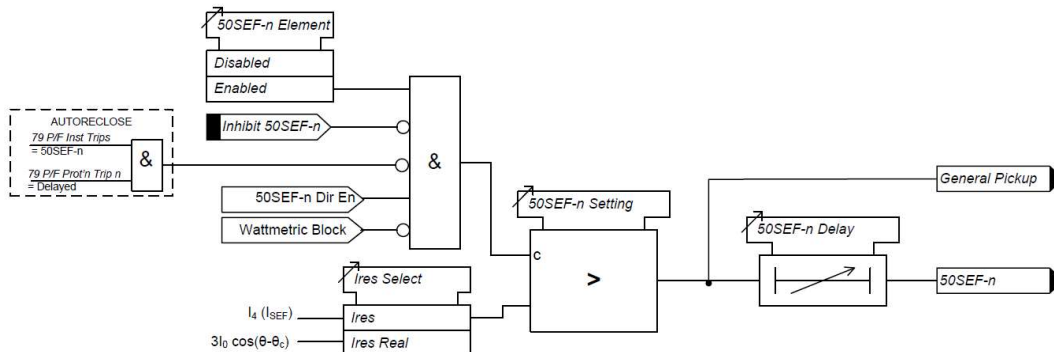
Figura 27 - Diagrama lógico da função direcional sensível - 67SEF



Fonte: Siemens (2017).

Para a proteção de falta à terra instantânea sensível (50SEF), cada elemento instantâneo tem configurações independentes para corrente de partida “50SEF-n Setting” e um temporizador “50SEF-n Delay”. O diagrama lógico da função é mostrado na Figura 28.

Figura 28 - Diagrama lógico da função instantânea sensível - 50SEF

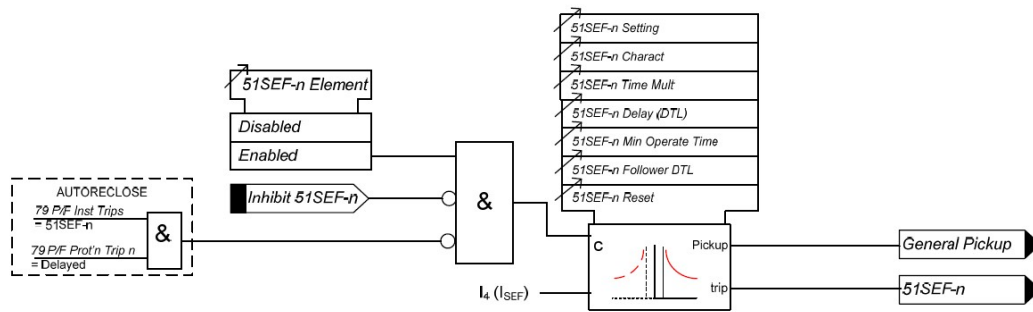


Fonte: Siemens (2017).

Na função de proteção de falta à terra temporizada sensível (51SEF), o bloco “51SEF-n Setting” ajusta o nível da corrente de partida. Muitos valores característicos temporizados são fornecidos. Um valor característico de curva de tempo inverso (IDMT) é selecionado a partir das curvas IEC e ANSI, usando-se “51SEF-n Char”. Um multiplicador de tempo é aplicado às curvas de valor característico, usando-se o ajuste “51SEF-n Time Mult”. De forma alternativa, um atraso de valor definido (DTL) pode ser escolhido, usando-se “51SEF-n Char”. Quando o DTL é selecionado, o multiplicador de tempo não é aplicado e o ajuste

“51SEF-n Delay (DTL)” é usado em seu lugar. A Figura 29 é apresentado o diagrama lógico da função.

Figura 29 - Diagrama lógico da função temporizada sensível - 51SEF



Fonte: Siemens (2017).

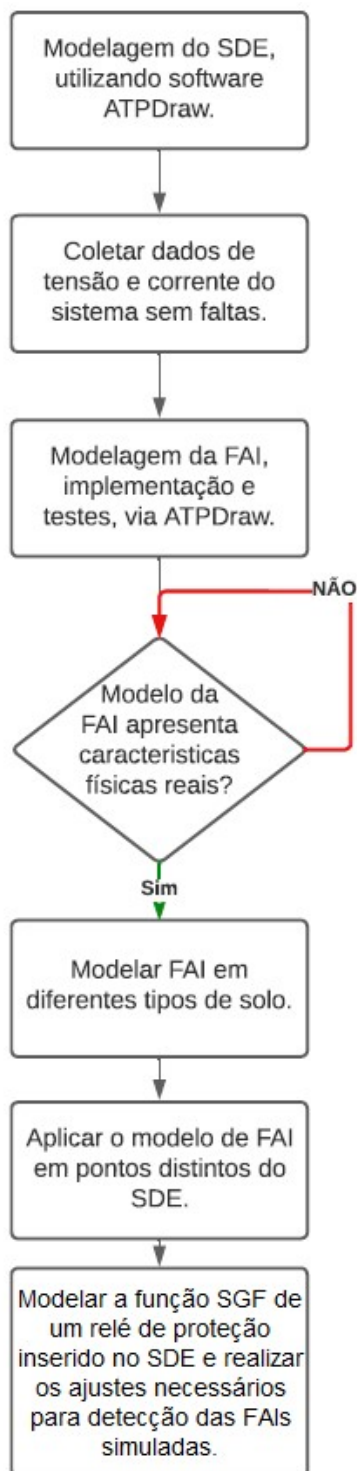
3 METODOLOGIA

Para validar o método proposto neste trabalho, se faz necessário implementar um modelo de falta de alta impedância e um modelo de relé de proteção com a função SGF, inserido em uma rede de distribuição de média tensão. Para tal abordagem, foram utilizados modelos numéricos simulados no domínio do tempo mediante o *Alternative Transient Program (ATP®)* versão 7.08.

ATP® é um programa de simulação digital que permite a análise de transitórios eletromagnéticos e eletromecânicos em redes polifásicas com configurações arbitrárias utilizando o método da matriz de admitância. A formulação matemática é baseada no método das características (método de Bergeron) para elementos com parâmetros distribuídos e na regra de integração trapezoidal para elementos com parâmetros concentrados. O ATP® não permite obter uma solução contínua no tempo, assim são calculados valores em intervalos de tempo discretos. O ATP® foi desenvolvido pelo Dr. Hermann Dommel no final da década de 1960 e até hoje o desenvolvimento do programa continua por meio de inúmeras contribuições de várias empresas e universidades ao redor do mundo.

Após a modelagem das faltas de alta impedância, em diferentes solos comuns em áreas urbanas, será efetuada a simulação, via ATP, da função SGF presente em relé de proteção, realizando os ajustes necessários para detecção do conjunto de faltas. A Figura 30 apresenta o fluxograma das etapas a serem desenvolvidas na metodologia deste trabalho.

Figura 30 - Fluxograma da metodologia proposta.

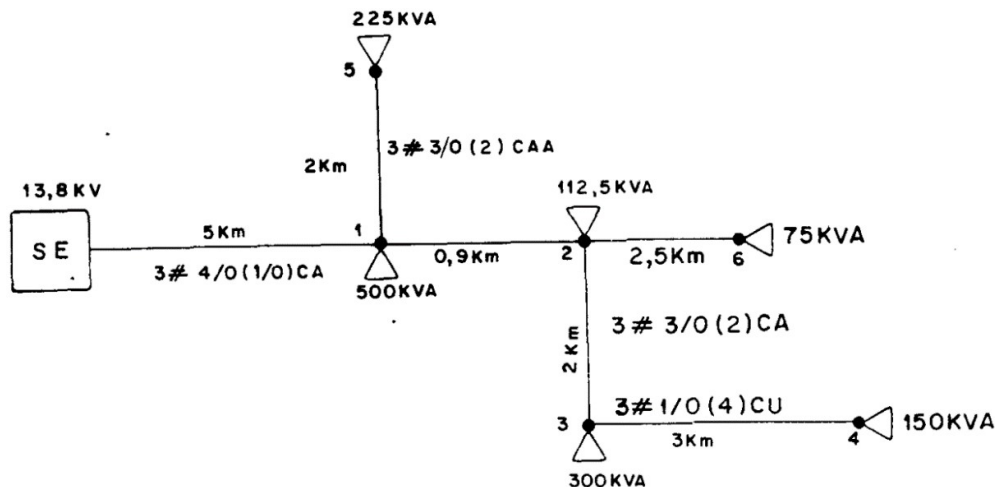


Fonte: o autor (2022).

3.1 MODELAGEM DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

O sistema de distribuição escolhido para ser a base da simulação foi retirado de um exemplo contido no livro de Curto-Circuito do Kindermann (1997). Sua escolha se deve por ser um sistema equilibrado, com diferentes carregamentos nas barras e diferentes condutores em cada trecho. O sistema é trifásico de média tensão, composto por um alimentador de 13,8kV e 6 barras com diferentes carregamentos em cada uma delas. A Figura 31 apresenta o sistema de distribuição em questão.

Figura 31 - Sistema de distribuição base da simulação



Fonte: Kindermann (1997).

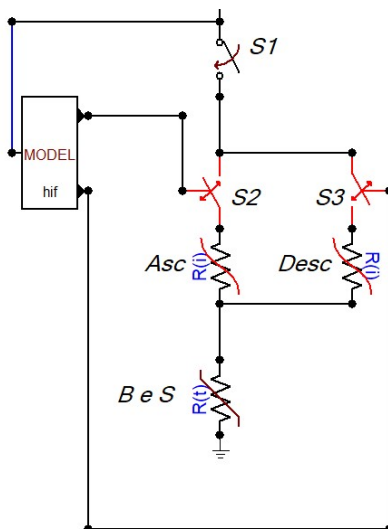
O modelo do sistema será reproduzido levando em consideração as impedâncias de cada tipo de condutor e seus comprimentos, conforme exemplo da Figura 31. Para as cargas, serão utilizadas as mesmas potências aparentes, porém não será levado em consideração o fator de potência 1. A modelagem deste sistema de distribuição será realizada utilizando o software ATP®.

3.2 MODELAGEM DA FAI

Para modelamento da falta de alta impedância, foi utilizado o modelo base desenvolvido por Nam et al. (2001), porém aprimorado por Farias (2017), que é composto por duas resistências variáveis com o acréscimo do controle em função

do tempo. O modelo foi escolhido pela facilidade de implementação. A Figura 32 mostra o modelo reproduzido no ATP.

Figura 32 - Modelo de FAI reproduzido no ATP



Fonte: o autor (2022).

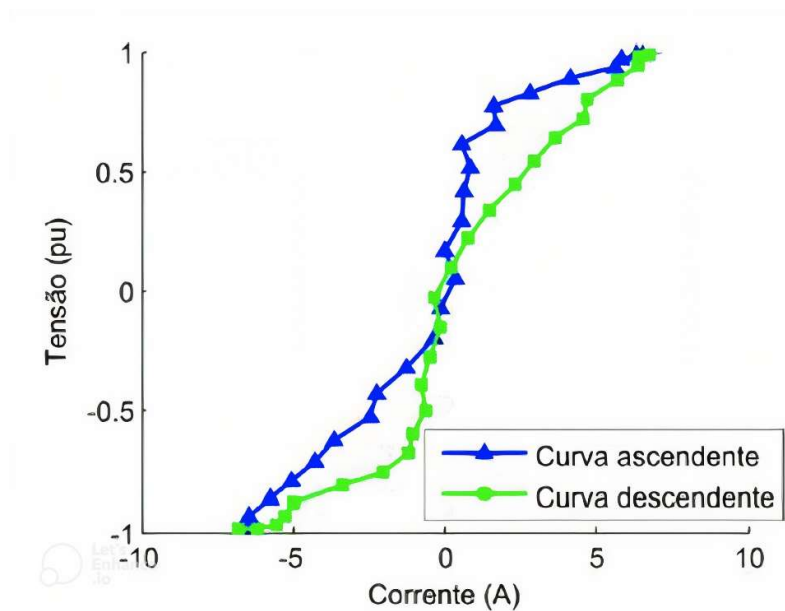
Neste modelo a chave “S1” é quem determina o tempo de queda do condutor, tempo este que deve ser inserido manualmente para fins de simulação. As resistências não-lineares, “Asc” e “Desc”, que são responsáveis pelas características de assimetria e não linearidade da FAI, são conectadas pelas chaves “S2” e “S3”. Essas chaves são controladas pelos ciclos de subida e descida da corrente e tensão do circuito, função esta que é realizada pelo bloco “hif” modelado na linguagem *MODELS*, que está programado para mudar o controle de suas saídas pela passagem por zero da tensão da fase em que acontece a falta.

Como cada tipo de solo possui suas próprias características, se faz necessário o ajuste dos valores relativos as resistências, ou seja, foi criado um modelo para cada solo utilizado na simulação. Os tipos de solos selecionados no trabalho foram asfalto, calçamento e grama, visto que são os solos mais comuns em áreas urbanas.

O estudo realizado por dos Santos (2011), através de experimentos reais em diversos tipos de solo, serviu como base para compor os valores das resistências “Asc” e “Desc”, que dão as características de não linearidade e assimetria da FAI. As resistências foram modeladas a partir das curvas de tensão

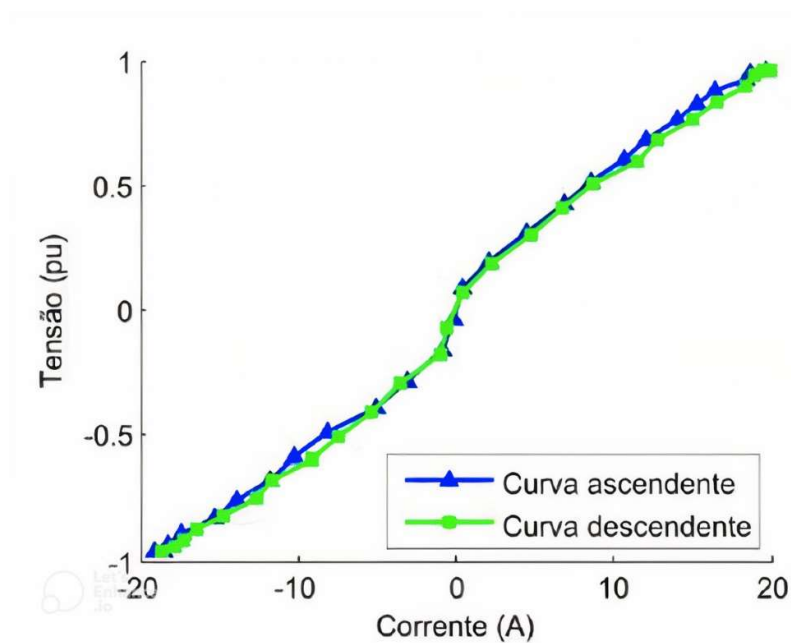
versus corrente do solo respectivo. A Figura 33 apresenta a curva relativa ao solo asfalto, a Figura 34 ao solo calçamento e a Figura 35 ao solo grama.

Figura 33 - Curva tensão x corrente do solo tipo asfalto



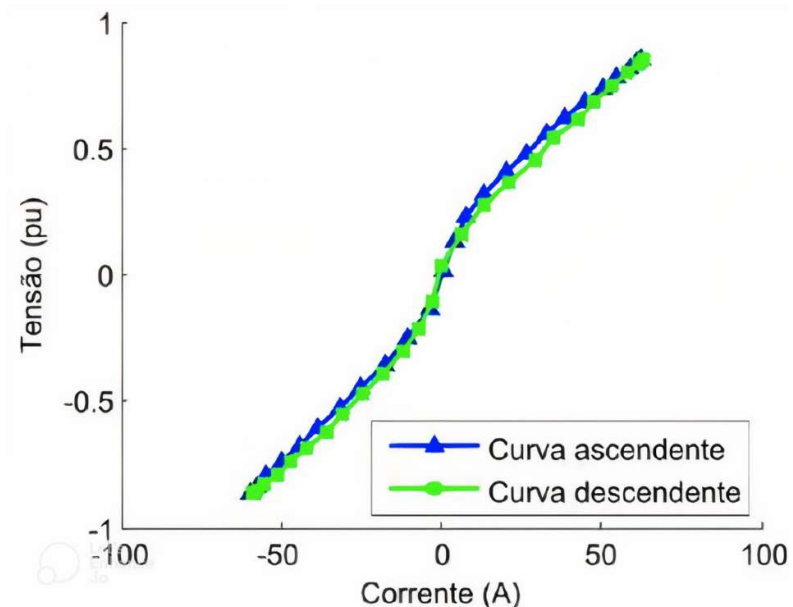
Fonte: dos Santos (2011).

Figura 34 - Curva tensão x corrente do solo tipo calçamento



Fonte: dos Santos (2011).

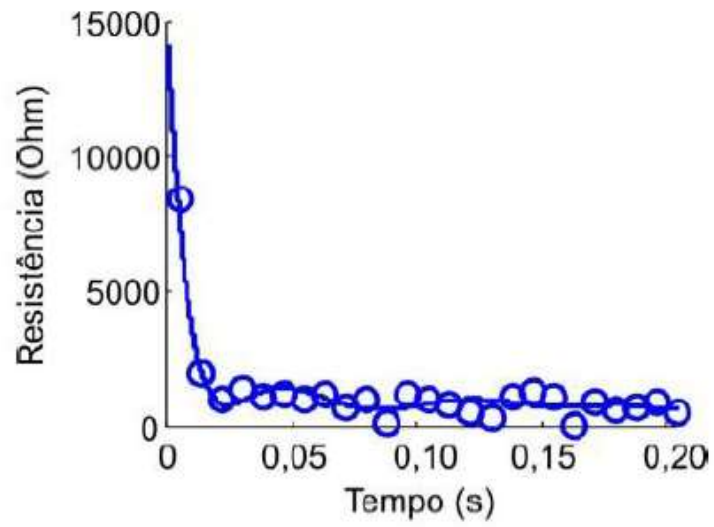
Figura 35 - Curva tensão x corrente do solo tipo grama



Fonte: dos Santos (2011).

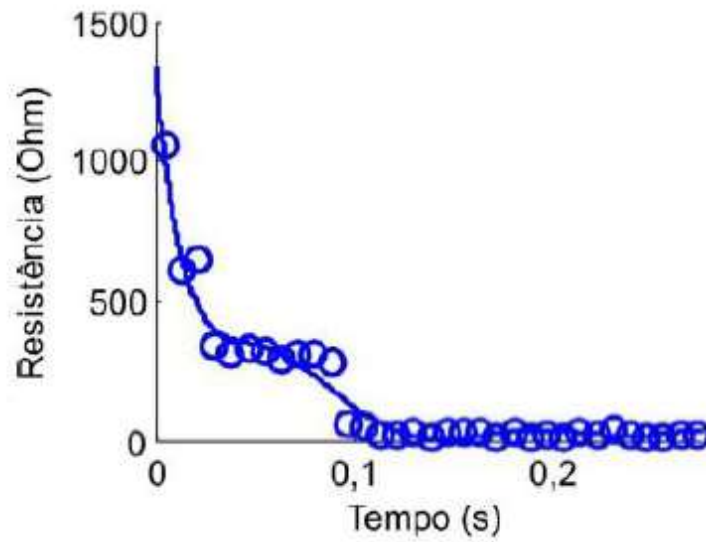
A resistência “B e S” do modelo, é responsável por inserir as características de *shoulder* e *buildup* da FAI. Essa resistência apresenta o comportamento da resistência de falta em função do tempo de contato do condutor energizado com o solo. Os valores desta resistência também variam para cada tipo de solo, e sua composição também seu deu através do estudo de dos Santos (2011). A Figura 36 apresenta a curva da resistência em função do tempo para o solo do tipo asfalto, a Figura 37 para o solo do tipo calçamento e a Figura 38 para o solo do tipo grama.

Figura 36 - Curva resistência x tempo do solo tipo asfalto



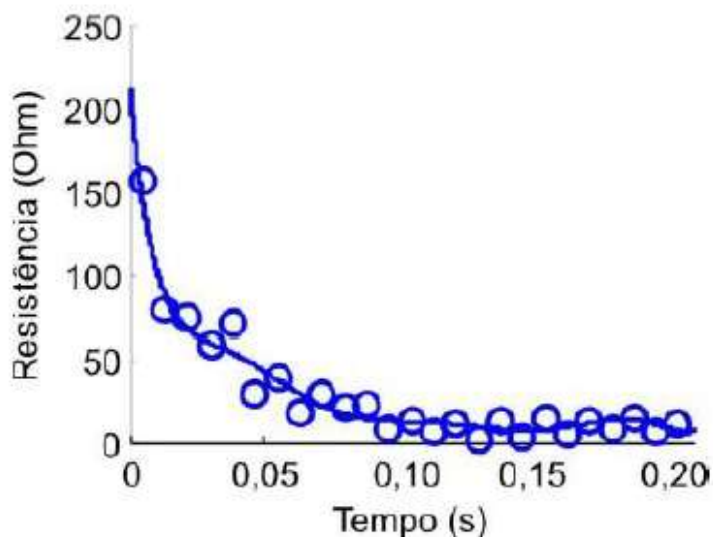
Fonte: dos Santos (2011).

Figura 37 - Curva resistência x tempo do solo tipo calçamento



Fonte: dos Santos (2011).

Figura 38 - Curva resistência x tempo do solo tipo grama



Fonte: dos Santos (2011).

3.3 MODELAGEM DA FUNÇÃO SGF DO RELÉ DE PROTEÇÃO

A metodologia usada neste trabalho para a detecção de FAI será baseada nas componentes simétricas de corrente e tensões, medidas a montante do ponto onde será considerado o rompimento do cabo. Serão utilizadas as componentes simétricas da corrente e da tensão de sequência zero (corrente e tensão residuais). A extração dos recursos utilizando o domínio do tempo das grandezas na frequência fundamental não são tão precisas, mas são de mais simples e fácil implementação com relativa segurança e confiabilidade.

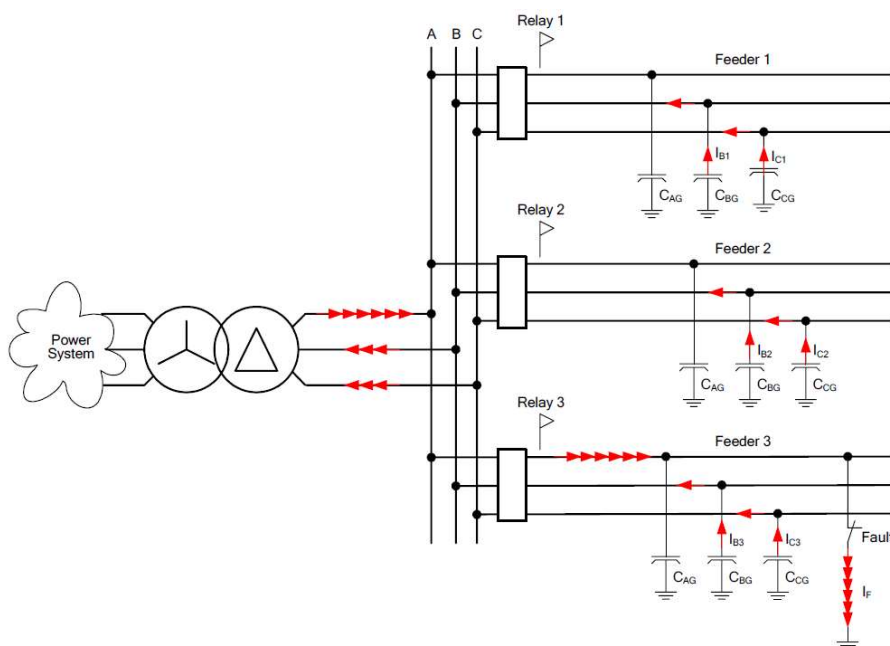
A corrente de falta à terra de alta impedância de sistemas não aterrados geralmente é muito menor do que a de sistemas multiaterrados, porém a detecção de falta de alta impedância de sistemas não aterrados pode ser mais confiável e determinística do que a detecção de falta de sistemas aterrados (HOU e FISCHER, 2007). Na Figura 39 é apresentado um sistema de distribuição típico não aterrado de três alimentadores, com uma FAI presente no alimentador 3. Segundo Hou e Fischer (2007), as seguintes características são apresentadas:

- A corrente de FAI depende das capacitâncias entre fase-terra de outros alimentadores da barra;
- Enquanto nos sistemas multi-aterrados as impedâncias série

influenciam na magnitude da corrente FAI, em sistemas não aterrados as impedâncias shunt ditam a magnitude da corrente FAI;

- A corrente de falta I_0 estará sempre defasada de 90° de V_0 de referência da fase em falta;
- A impedância de falta não influencia na relação angular entre I_0 e V_0 ;
- É possível determinar através da relação entre os ângulos de I_0 e V_0 a direção de ocorrência da FAI;
- A determinação da fase em falta é relacionada com a defasagem em 120° entre as outras fases;

Figura 39 – Sistema de potência não aterrado com falha fase-terra no alimentador 3

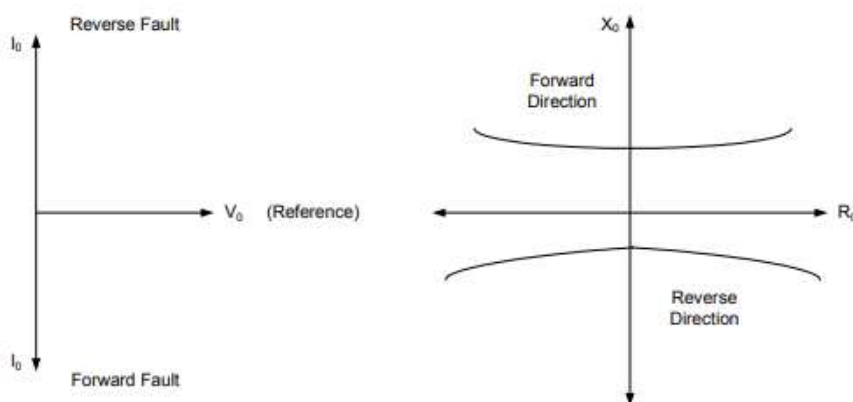


Fonte: Hou e Fischer (2007).

Em casos de falta de fase, que representa o rompimento do condutor, observa-se o surgimento de sequência negativa, redução de correntes primárias e o aumento da tensão e corrente de sequência zero, no alimentador sob falta, à montante desta falta. Embora essas mesmas grandezas já possuam valores iniciais maiores que zero devido ao desequilíbrio das cargas entre as fases, a abertura da fase causada por rompimento do condutor provoca variações ainda

maiores, o que permite distinguir as duas situações, na transição do estado de regime permanente para a condição de FAI. Em um sistema não aterrado, a tensão de sequência zero V_0 e a corrente de sequência zero I_0 são utilizadas para definição do ângulo de máximo torque da impedância de sequência zero, conforme mostra a Figura 40.

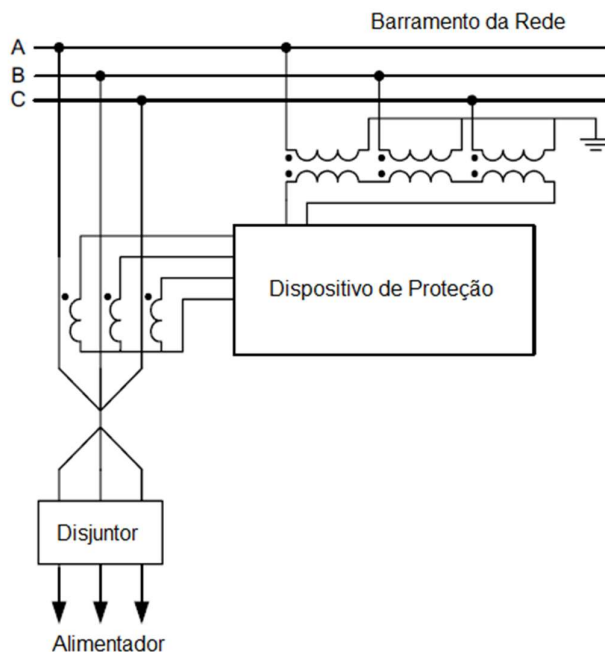
Figura 40 - Plano de impedância de sequência zero



Fonte: Fischer e Hou (2006).

As conexões típicas de transformadores de instrumentação em um dispositivo de proteção para uma rede não aterrada são mostradas na Figura 41. O transformador de potencial (TP) é utilizado para fornecer a tensão residual ao relé de proteção. Os transformadores de corrente de fase, além de serem utilizados para leitura da correntes de fase, também são utilizados para medir a corrente residual no alimentador.

Figura 41 - Conexões típicas de transformadores de instrumentação a um dispositivo de proteção para um sistema de energia não aterrado



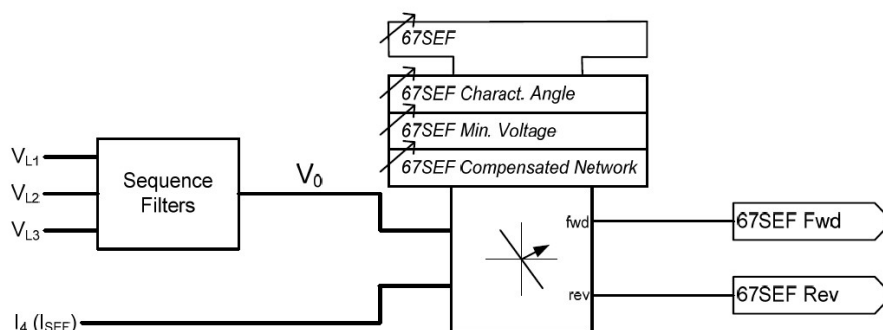
Fonte: Adaptado de Hou e Fischer (2007).

Na rede de sequência zero, um sistema não aterrado tem uma impedância muito alta quando comparada com as impedâncias de rede de sequência positiva e negativa, as quais podem ser suprimidas para avaliar faltas fase-terra sem perda significativa de precisão (HOU e FISCHER, 2007).

Na ocorrência da FAI, o condutor rompido cai e faz contato com o solo estabelecendo a circulação de correntes de sequência zero no alimentador, na transição da condição de falta de fase para o estabelecimento da FAI, ocorre um aumento do valor da corrente residual à montante e consequente aumento da tensão residual. Essas grandezas podem ser utilizadas extraídas pela função sensível à FAI fase-terra (ANSI 67SEF) do relé de proteção (HOU; FISCHER, 2007).

A função ANSI 67SEF indica a detecção da FAI e sua direção pela relação angular entre I_0 e V_0 , uma vez que determina se a falta está no próprio alimentador, dando mais eficiência ao diagnóstico. A Figura 42 apresenta o digrama da função 67SEF disposta em um relé de proteção da Siemens.

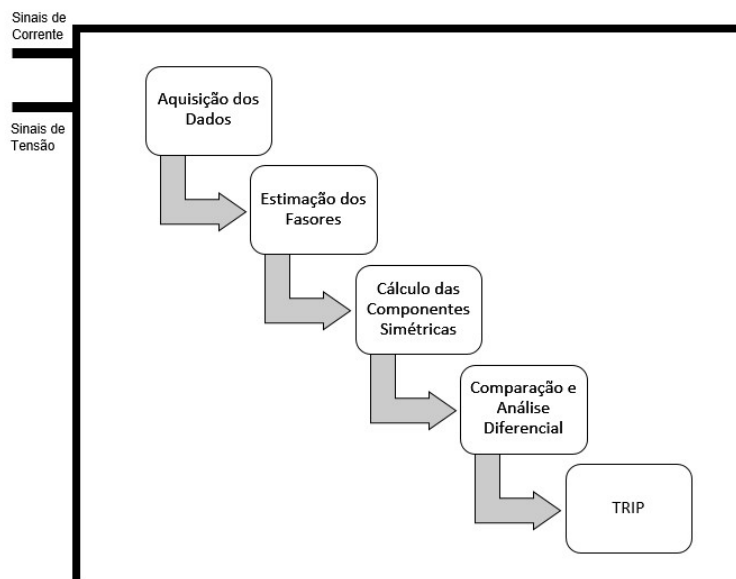
Figura 42 – Função ANSI 67SEF presente em um relé de proteção da Siemens



Fonte: Siemens (2017).

Para modelagem da função SGF do relé de proteção, foi utilizada a linguagem *MODELS*, presente no software ATP. O relé faz a leitura e tratamento dos sinais de corrente e tensão vindos dos secundários dos transformadores de instrumentação, posteriormente esses sinais são transformados em fasores com módulo e fase, são calculadas as componentes simétricas e por fim é feita a comparação e análise diferencial para comutar, ou não, a saída de *trip* do relé. Um resumo da simulação pode ser visualizado no diagrama de blocos, que está apresentado na Figura 43.

Figura 43 - Diagrama de blocos da função SGF modelada



Fonte: o autor (2022).

3.4 ESTUDOS DE CASO

No intuito de testar a metodologia exposta anteriormente, definiu-se aplicar a falta de alta impedância em três pontos do sistema de distribuição, primeiramente logo após da localização da Barra 1 (P1), um intermediário entre a Barra 2 e Barra 6 (P2) e outro entre a Barra 3 e Barra 4 (P3). A escolha da aplicação dos pontos de falta no sistema foi determinada afim de aplicar a mesma em diferentes pontos de carga, analisando faltas próximas, faltas intermediárias e distanciadas em relação ao relé simulado. Após a simulação da FAI em cada um dos pontos, será testada a função SGF do relé de proteção, realizando os ajustes necessários para cada caso, afim de analisar a detecção destas faltas pela função.

Nestes pontos serão aplicadas FAIs para 3 tipos de solo comuns na área urbana, asfalto, calçamento e grama, resultando assim em 9 casos diferentes.

CASO 1: Aplicação da FAI com solo do tipo asfalto em P1.

CASO 2: Aplicação da FAI com solo do tipo asfalto em P2.

CASO 3: Aplicação da FAI com solo do tipo asfalto em P3.

CASO 4: Aplicação da FAI com solo do tipo calçamento em P1.

CASO 5: Aplicação da FAI com solo do tipo calçamento em P2.

CASO 6: Aplicação da FAI com solo do tipo calçamento em P3.

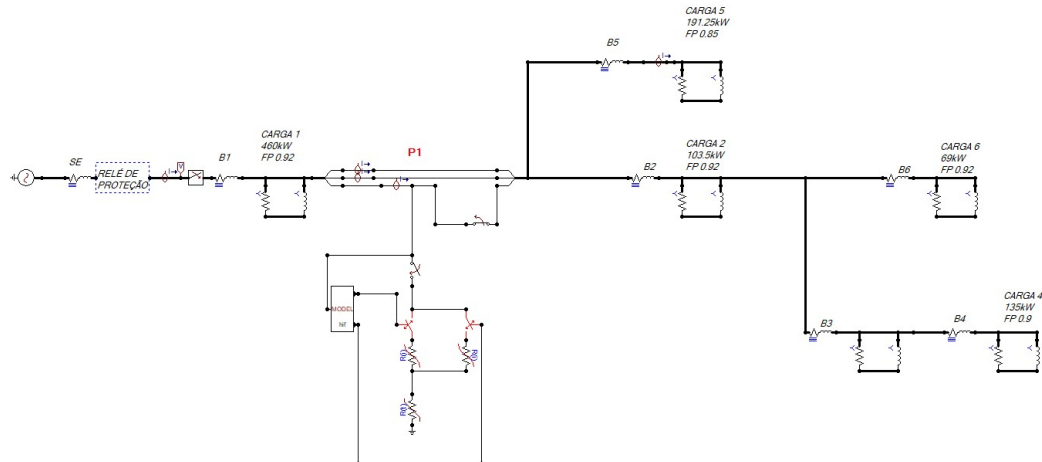
CASO 7: Aplicação da FAI com solo do tipo grama em P1.

CASO 8: Aplicação da FAI com solo do tipo grama em P2.

CASO 9: Aplicação da FAI com solo do tipo grama em P3.

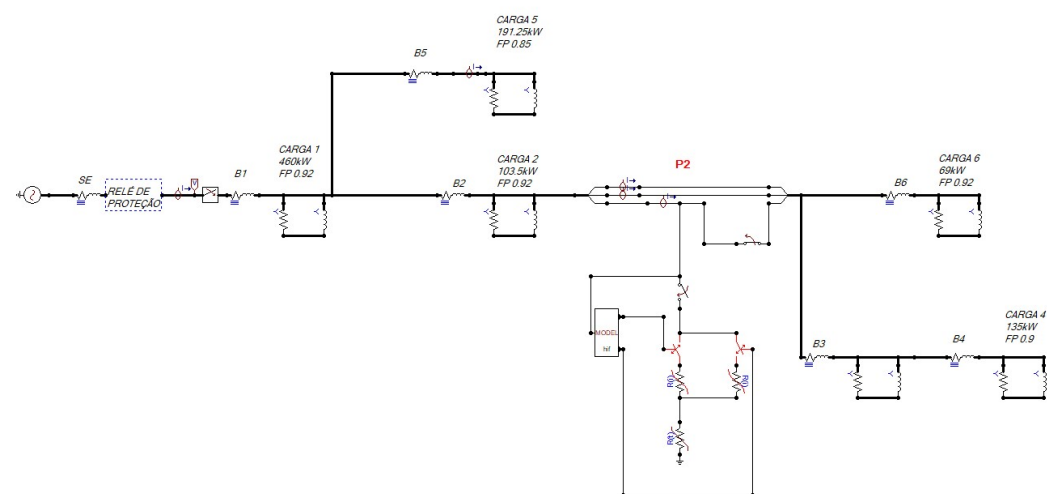
A Figura 44 representa a localização da falta no ponto P1, ponto mais próximo ao relé, a Figura 45 representa a falta aplicada no ponto P2, ponto intermediário do sistema e, a Figura 46, mostra a localização da falta no ponto P3, ponto mais afastado do relé de proteção.

Figura 44 - FAI inserida no ponto P1 do sistema



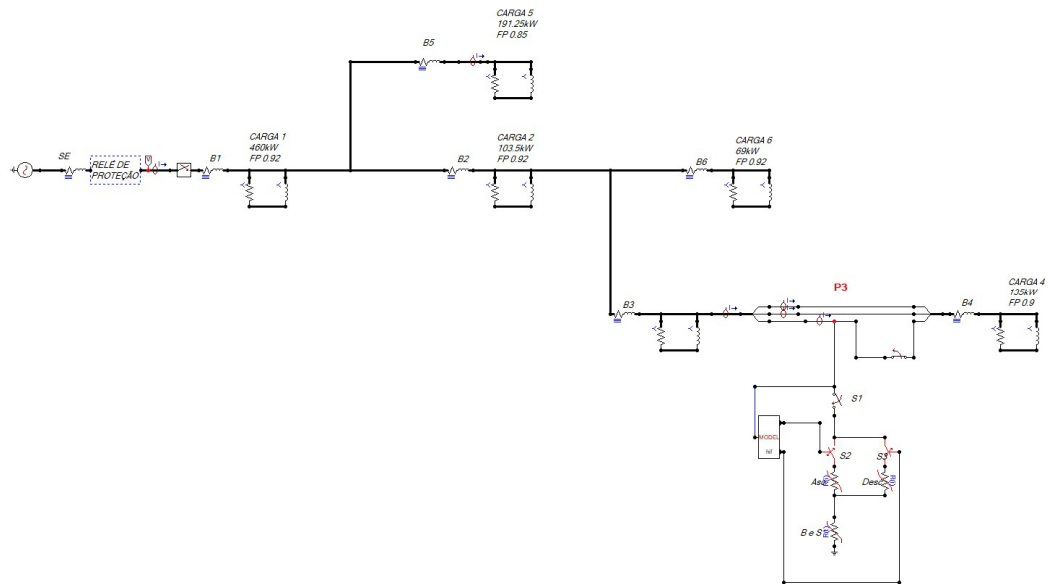
Fonte: o autor (2022).

Figura 45 - FAI inserida no ponto P2 do sistema



Fonte: o autor (2022).

Figura 46 - FAI inserida no ponto P3 do sistema



Fonte: o autor (2022).

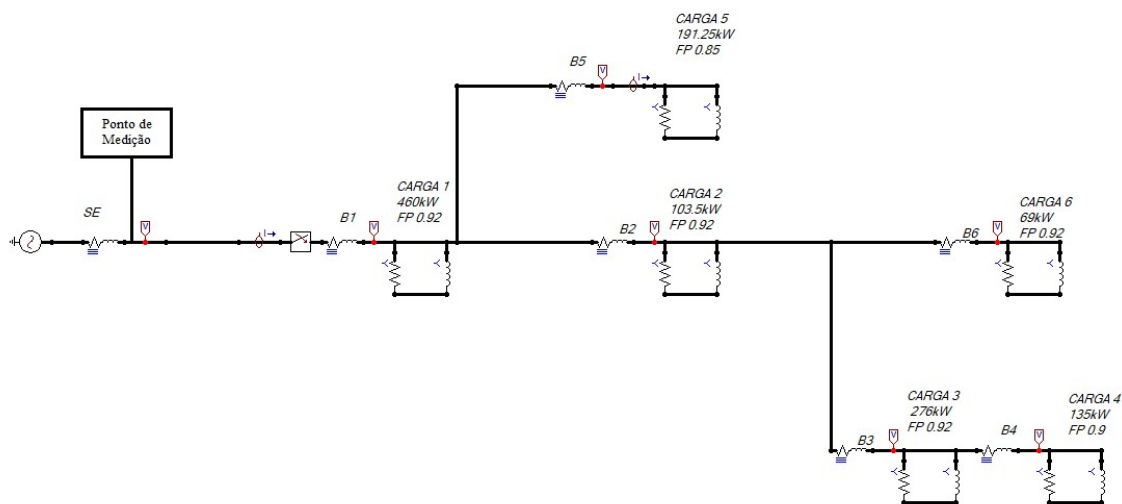
4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados da metodologia proposta no capítulo 3 deste trabalho, bem como a sua capacidade de atender os objetivos pelos quais ele foi realizado. A estruturação dos resultados desse estudo, traz os dados das simulações do sistema de distribuição sem a inserção das faltas, do modelo de FAI para cada tipo de solo, da simulação da função SGF do relé de proteção e por fim das simulações com a FAI e o relé inseridos no sistema de distribuição.

4.1 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

O modelo do sistema da Figura 31, reproduzido no ATP, está apresentado na Figura 47. Para esse modelo os valores inseridos de impedâncias das linhas e os valores utilizados nas cargas, são mostrados nas Tabelas 4 e 5 respectivamente.

Figura 47 - Modelo do sistema de distribuição simulado



Fonte: o autor (2022).

Tabela 4 - Impedâncias das linhas do modelo simulado

Local	Resistência [ohm]	Indutância [mH]
Fonte (SE)	0,5713	4,0413
LD SE/B1	1,485	5,6235
LD B1/B2	0,2673	1,0122
LD B1/B5	0,898	2,642
LD B2/B6	0,7425	2,8117
LD B2/B3	0,75	2,2971
LD B3/B4	1,131	3,5889

Fonte: o autor (2022).

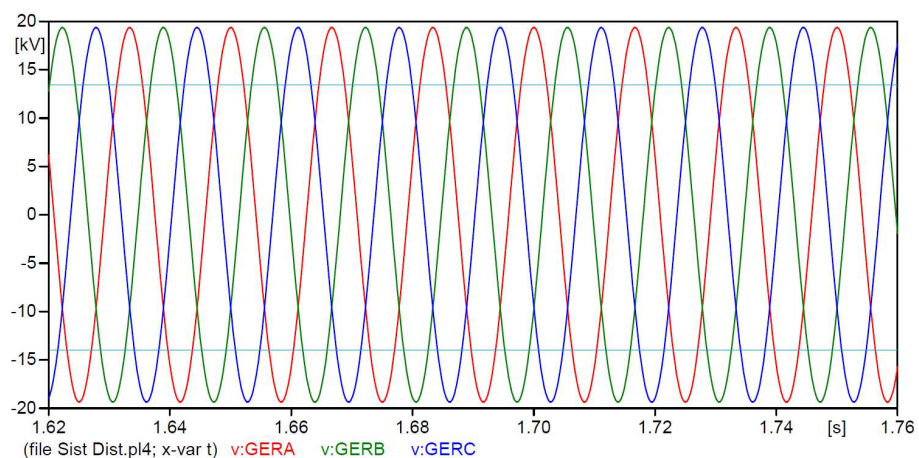
Tabela 5 - Valores das cargas utilizadas na simulação

	Potência [W]	FP	Rc [ohm]	Xlc [ohm]	L [mH]
CARGA 1	460000	0,92	414	971,8	2578
CARGA 2	103500	0,92	1840	4319,3	11457
CARGA 3	276000	0,92	690	1619,7	4296
CARGA 4	135000	0,9	1411	2912,7	7726
CARGA 5	191250	0,85	996	1606,7	4262
CARGA 6	69000	0,92	2760	6478,9	17186

Fonte: o autor (2022).

As curvas de tensão e corrente no “Ponto de Medição”, indicado na Figura 47, estão representadas nas figuras 48 e 49 respectivamente.

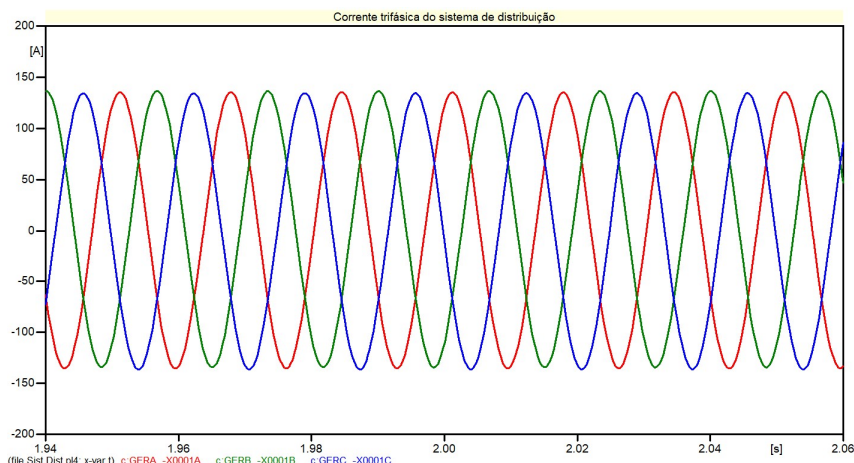
Figura 48 – Curva de tensão trifásica do sistema de distribuição simulado



Fonte: o autor (2022).

O valor de pico da tensão para as 3 fases, apresentados na Figura 48, foi de 19516V.

Figura 49 - Curva de corrente trifásica do sistema de distribuição simulado



Fonte: o autor (2022).

Os valores de pico das correntes, mostradas na Figura 49, foram 135,5A para fase A, 135,6A para fase B e 135,4A para fase C. A simulação do sistema de distribuição, sem a inserção de FAI, apresenta resultados esperados, operando de forma equilibrada, pois não há cargas desbalanceadas, conforme mostrado nas curvas de tensão e corrente do sistema.

4.2 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DE FAI

Para verificação do modelo de FAI proposto neste trabalho, foram feitas as simulações de FAIs para os três tipos de solos mencionados na metodologia, afim de comprovar se o modelo da falta apresenta as características de assimetria, não-linearidade, *buildup*, *shoulder* e intermitência, presentes nas FAIs.

O tempo de queda do condutor, que se dá desde o rompimento até o contato com o solo, representado no modelo pela chave “S1”, foi determinado para todas as simulações em 0,5 segundos. Todas as simulações foram realizadas utilizando a fase C do sistema.

A cronologia das simulações foi feita de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 - Cronologia de simulação da FAI

Tempo (s)	Situação
2	Condutor desconectado do circuito
$2 < t < 2,5$	Corrente nula, condutor em queda
2,5	Condutor entra em contato com o solo

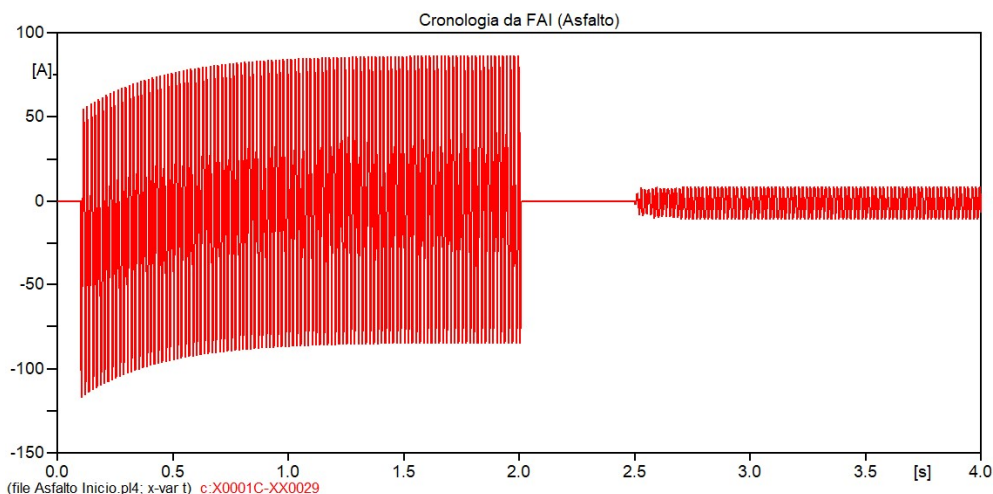
Fonte: o autor (2022).

Para cada tipo de solo, foram utilizados valores correspondentes nas resistências “Asc”, “Desc” e “B e S”, extraídos das curvas características. Os valores correspondentes das curvas de cada tipo de solo estão apresentados no Apêndice A. As medições dos valores de corrente das simulações das FAIs foram realizadas na fase em falta, diretamente sobre a falta.

4.2.1 FAI para solo do tipo asfalto

Na Figura 50 é apresentada a cronologia da FAI para o solo do tipo asfalto.

Figura 50 - Cronologia da FAI para solo do tipo asfalto

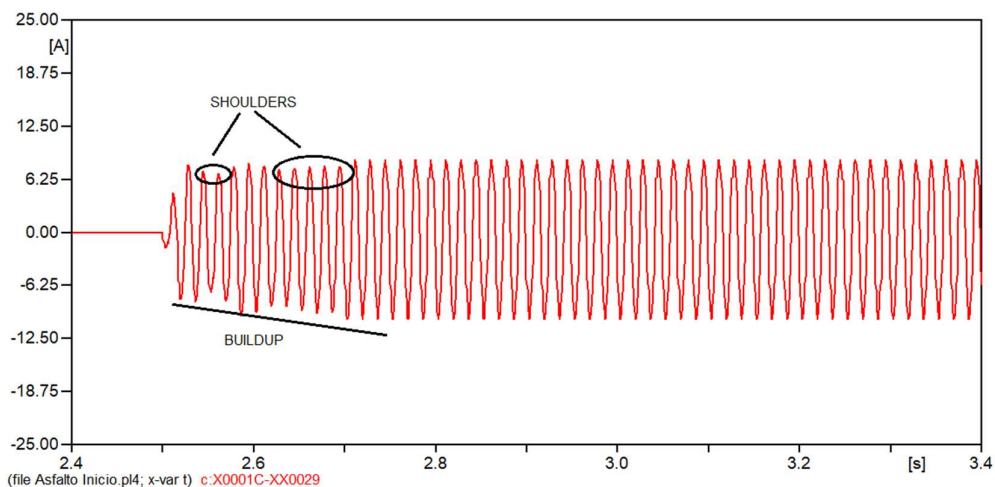


Fonte: o autor (2022).

Pode-se verificar, observando a Figura 50, que no instante 2 [s] ocorre o rompimento do condutor, a partir disto a corrente vai a 0A e no instante 2,5 [s] o condutor toca o solo, ocasionando a FAI.

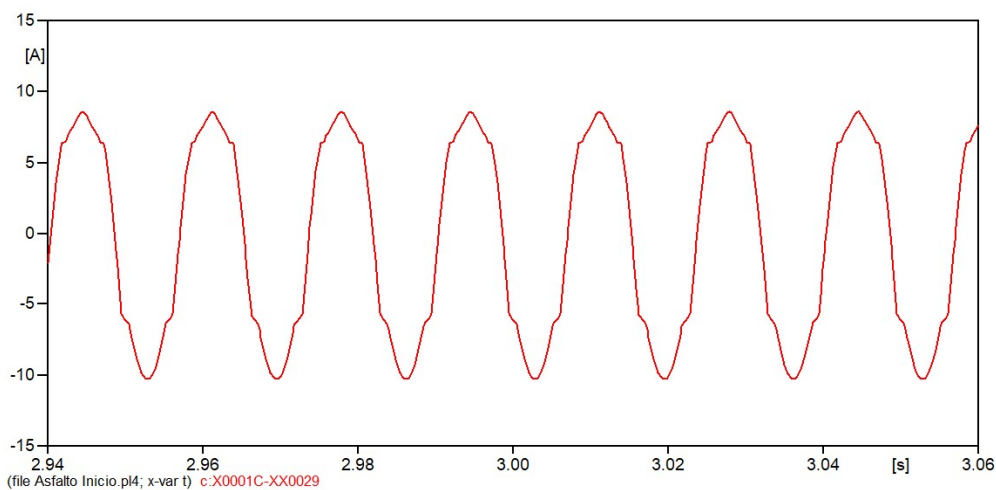
As figuras 51 e 52 apresentam a forma de onda da corrente na fase C, onde foi inserida a falta, bem como seu detalhe.

Figura 51 - Corrente da FAI solo tipo asfalto



Fonte: o autor (2022).

Figura 52 - Detalhe da corrente de FAI solo tipo asfalto



Fonte: o autor (2022).

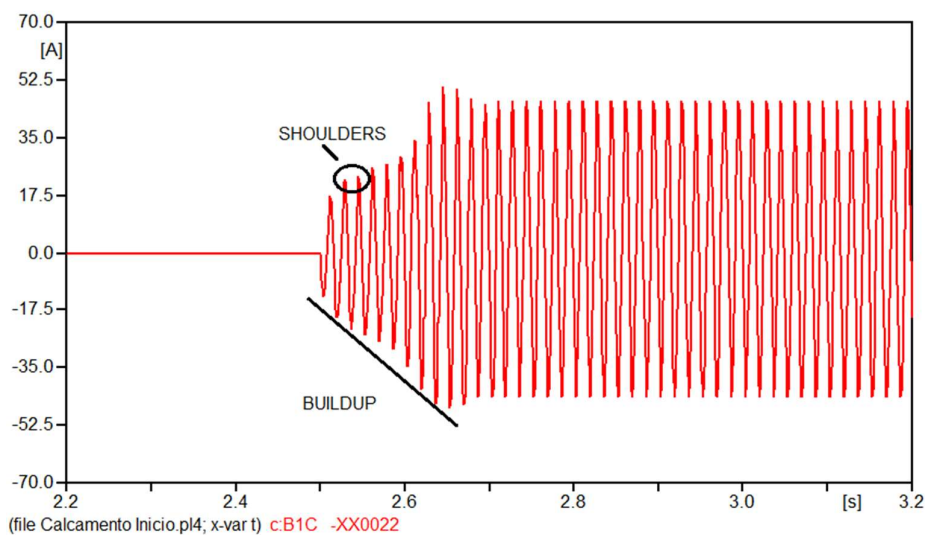
Analisando a forma de onda da falta na Figura 51, pode-se observar a presença das características de FAI, *buildup*, *shoulder* e também a intermitência. Já na Figura 52, é possível observar, de maneira discreta, as características de assimetria e não-linearidade da FAI.

Outra característica que também evidencia o correto modelamento da falta, é o valor da corrente para a FAI, que segundo dos Santos (2011), para solo do tipo asfalto é menor que 20A.

4.2.2 FAI para solo do tipo calçamento

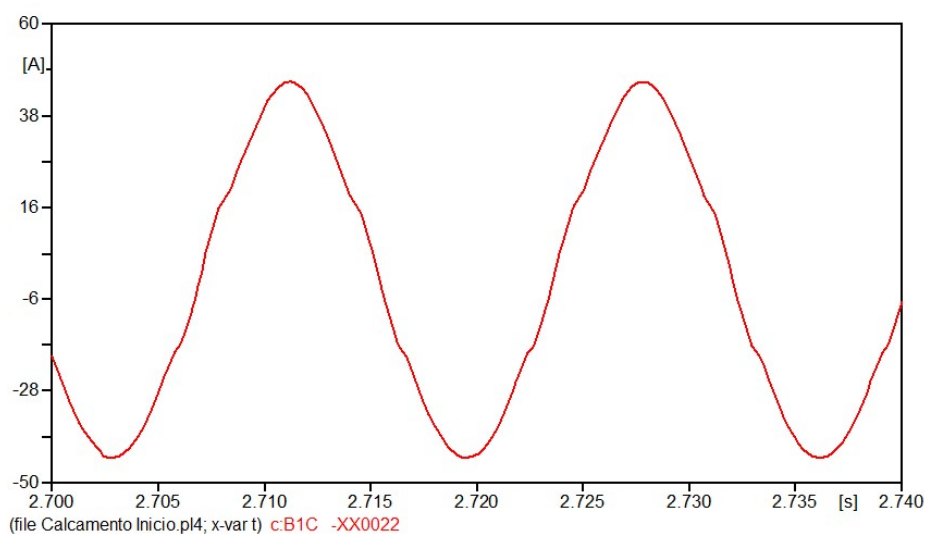
Seguindo o mesmo padrão de simulação já descrito, as Figuras 53 e 54 mostram a forma de onda da FAI, para o solo do tipo calçamento.

Figura 53 - Corrente da FAI solo tipo calçamento



Fonte: o autor (2022).

Figura 54 - Detalhe da corrente de FAI solo tipo calçamento



Fonte: o autor (2022).

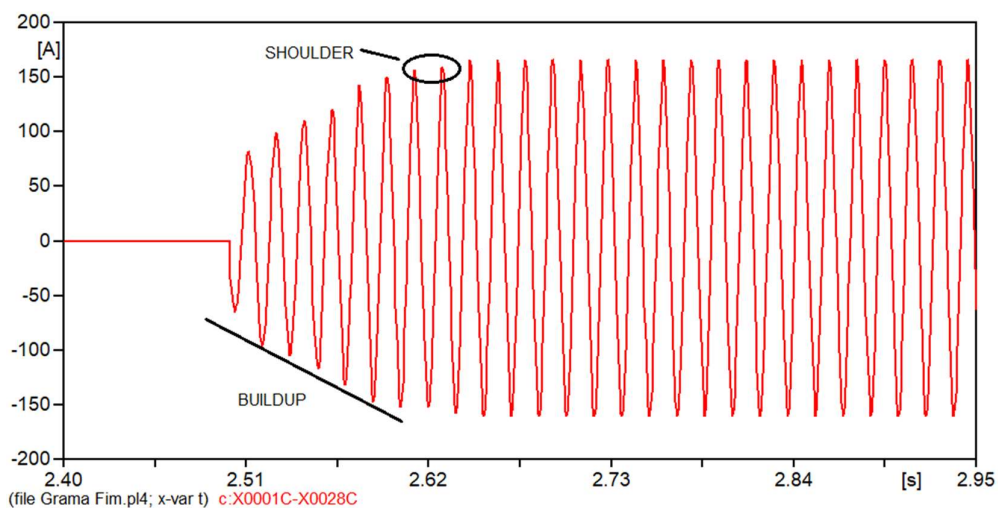
Na simulação para o solo tipo calçamento, na Figura 53, observar-se mais

claramente, em relação a FAI do tipo asfalto, a presença das características de *buildup*, *shoulder* e também a intermitência. No detalhe da curva de corrente, mostrado na Figura 54, fica evidenciado de forma clara as características de assimetria e não-linearidade da FAI.

4.2.3 FAI para solo do tipo grama

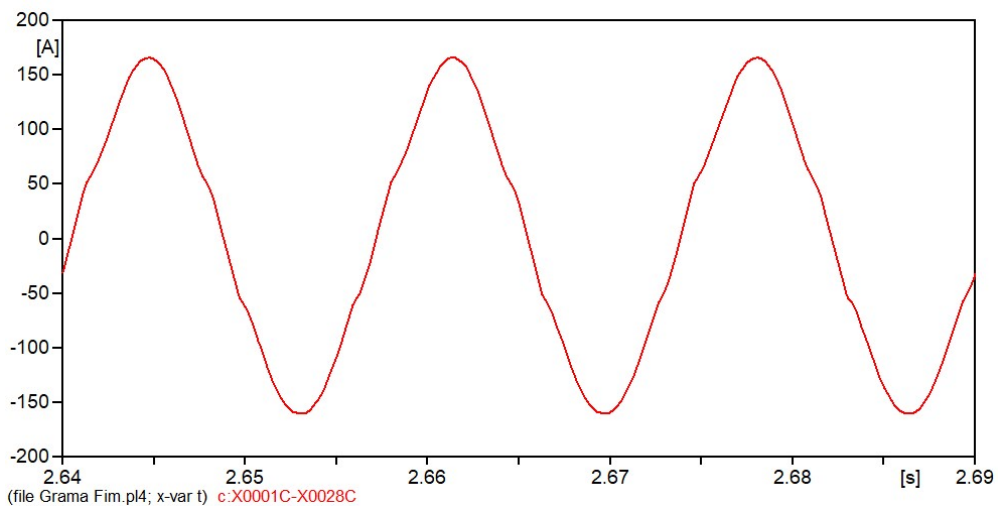
Para o terceiro tipo de solo, a grama, as Figuras 55 e 56 apresentam a forma de onda da FAI.

Figura 55 - Corrente da FAI solo tipo grama



Fonte: o autor (2022).

Figura 56 - Detalhe da corrente de FAI solo tipo grama



Fonte: o autor (2022).

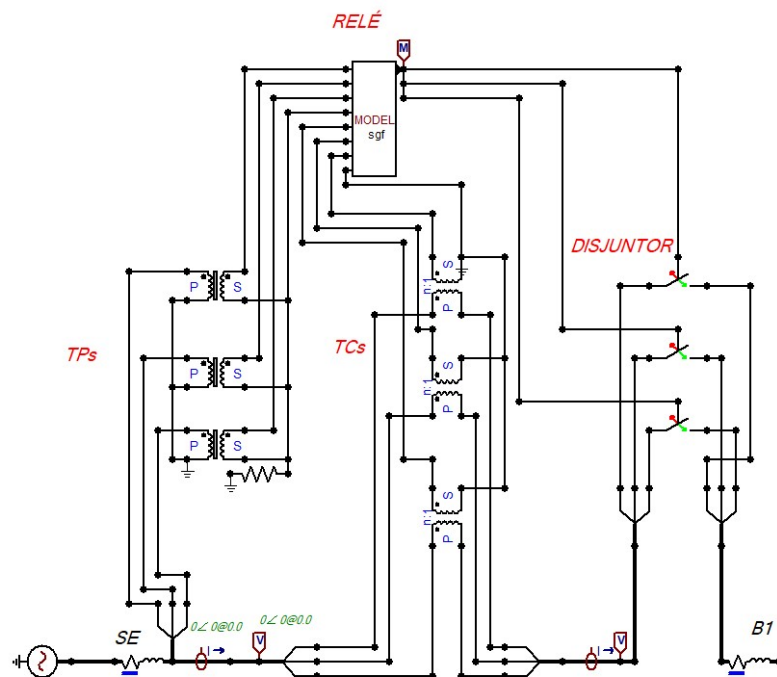
Para o solo do tipo grama, nas Figuras 55 e 56, foi possível observar a presença das características de *buildup*, *shoulder*, a intermitência, não-linearidade e assimetria.

Foi possível perceber que o modelo de FAI utilizado, apresentou as principais características da falta para todos os solos simulados, desta forma, os resultados obtidos foram satisfatórios.

4.3 IMPLEMENTAÇÃO DA FUNÇÃO SGF DO RELÉ DE PROTEÇÃO

Para o modelamento da função SGF do relé de proteção foram conectados ao circuito 3 transformadores de potencial (TP) e 3 transformadores de corrente (TC). Esses transformadores são responsáveis por fornecer os sinais de tensão e corrente na entrada do bloco “sgf”. No bloco está feita a lógica para o tratamento dos sinais, para resolução dos fasores, para determinação das componentes de sequência e posteriormente a análise das mesmas, para então definir se no circuito possui uma FAI e acionar a saída de disparo (*trip*). A saída de *trip* controla 3 chaves monofásicas que representam o disjuntor trifásico do circuito. Na Figura 57 é apresentada a modelagem do relé com a função SGF, juntamente com os transformadores de instrumentação e o disjuntor trifásico.

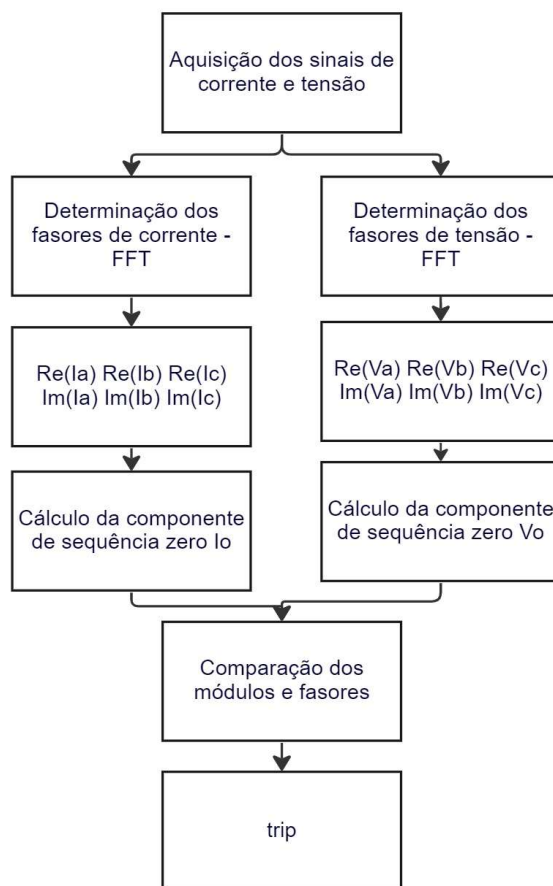
Figura 57 - Modelagem do relé com função SGF e disjuntor



Fonte: o autor (2022).

Para a aquisição dos valores de sequência negativa da tensão e corrente, foi utilizado o código de um bloco do próprio ATPdraw como base. Esse bloco contém dois tipos de algoritmos para determinação dos fasores. Foi utilizado o algoritmo baseado na Transformada Rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*) em detrimento da transformada discreta devido à sua simplicidade de se utilizar menos pontos por ciclo e pela sua velocidade. Esse tipo de cálculo é necessário para a determinação do fasor (componentes reais e imaginárias) para o cálculo das transformadas das componentes de sequência. Na Figura 58 esta é apresentada um diagrama de blocos com a sequência do código utilizado na função SGF. A lógica contida no bloco MODEL está disposta no apêndice B deste trabalho.

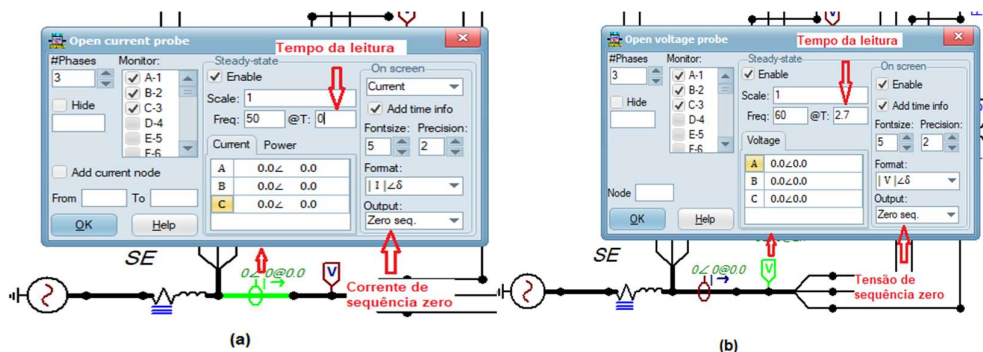
Figura 58 - Sequência de blocos da lógica da função SGF



Fonte: o autor (2022).

Como não é possível colocar em gráfico as variáveis internas do MODEL, foi utilizada uma função intrínseca das ponteiras de provas do software, que habilita mostrar em tela os valores de tensão e corrente de sequência zero em um tempo qualquer. Os valores das ponteiras de prova servem para exemplificar o formato dos fasores internos do bloco “sgf”. Na Figura 59 é apresentado as configurações das ponteiras de provas para fazer a leitura destas variáveis.

Figura 59 - Leitura dos valores de sequência zero através das provas de medições (a) corrente e (b) tensão



Fonte: o autor (2022).

A Tabela 7 apresenta os valores de corrente e tensão, extraídos das ponteiros de prova, em tempos distintos do sistema para a FAI com solo do tipo asfalto no ponto P3. Pode-se verificar que no período onde não está presente a FAI, os valores de tensão e corrente de sequência são nulos. O mesmo acontece durante o tempo de queda do condutor. Já no momento em que ocorre o contato do condutor com o solo, surgem tensões e correntes de sequência 0. Os valores foram mensurados externamente ao bloco.

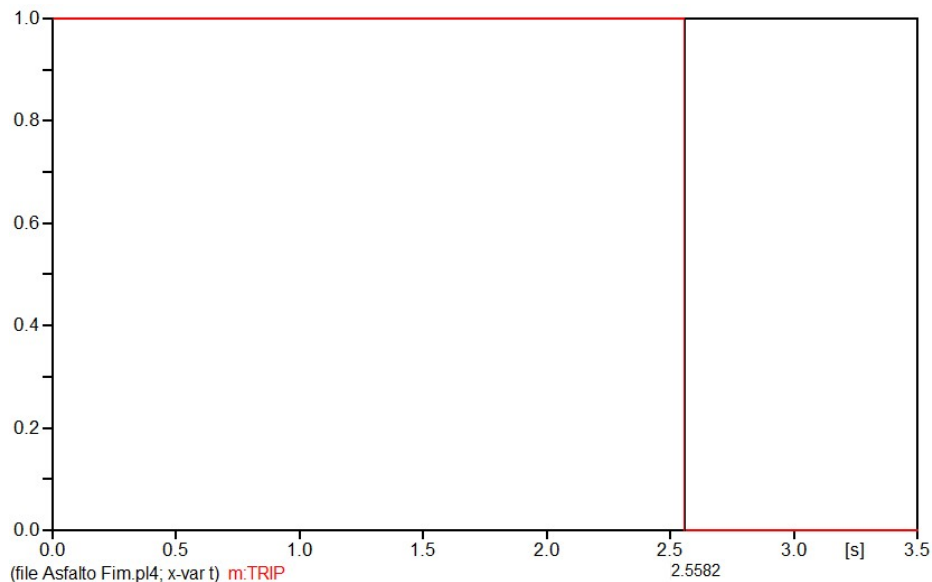
Tabela 7 - Leitura das correntes, tensões e sequência 0 da FAI em asfalto no ponto P3

ASFALTO											
		Ponto P3									
		Tempo (s)					Ocorrência da FAI				
		Sistema sem falta		Tempo durante queda do condutor							
		1	1,9	2,1	2,3	2,4	2,5	2,55	2,6	2,7	3
Corrente (A)	Seq 0	0L_119	0L_119	0L_119	0L_119	0L_119	0L_163	3L_119	3L_119	3L_119	3L_120
Tensão (V)	Seq 0	0L_120	0L_144	0L_24	0L_91	0L_125	0L_-17	4L_11	6L_1	5L_8	5L_-5
Defasagem angular (°)		-1	-25	143	28	-6	180	108	118	111	125

Fonte: o autor (2022).

O algoritmo compara quando essas correntes e tensões de sequência 0 possuem módulos maiores que 0,01 e defasagem angular maior ou igual a 90° para comutar a saída *trip* do bloco. No caso da FAI da Tabela 7, o *trip* envia o sinal de abertura para o disjuntor no segundo 2,55. A Figura 60 apresenta o gráfico do *trip* de saída do bloco na detecção desta falta.

Figura 60 - Comutação da saída da função SGF na detecção da FAI em solo asfalto no ponto P3

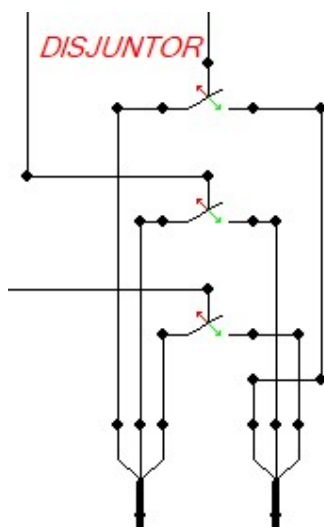


Fonte: o autor (2022).

Para a modelamento do disjuntor, foi utilizada uma chave comandada por um sinal advindo de um MODEL. A chave abre com um sinal de valor zero e fecha com um sinal valor 1. De tal forma que os sinais de *trip* são sinais “ativos baixo” para abrir o disjuntor em situação de falta.

Foi utilizada a simplificação do disjuntor como chave comandada, sem a modelagem de arco (não é escopo deste trabalho o estudo da abertura do disjuntor e sim a atuação da proteção relacionada ao sistema), portanto neste modelo não está sendo considerado o tempo de abertura deste equipamento baseado no seu modelo construtivo. A chave utilizada é definida como *TACS switch (Type 13)*, que é apresentada na Figura 61, arranjadas na forma de uma chave trifásica com um sinal de *trip*.

Figura 61 - Modelo do disjuntor trifásico



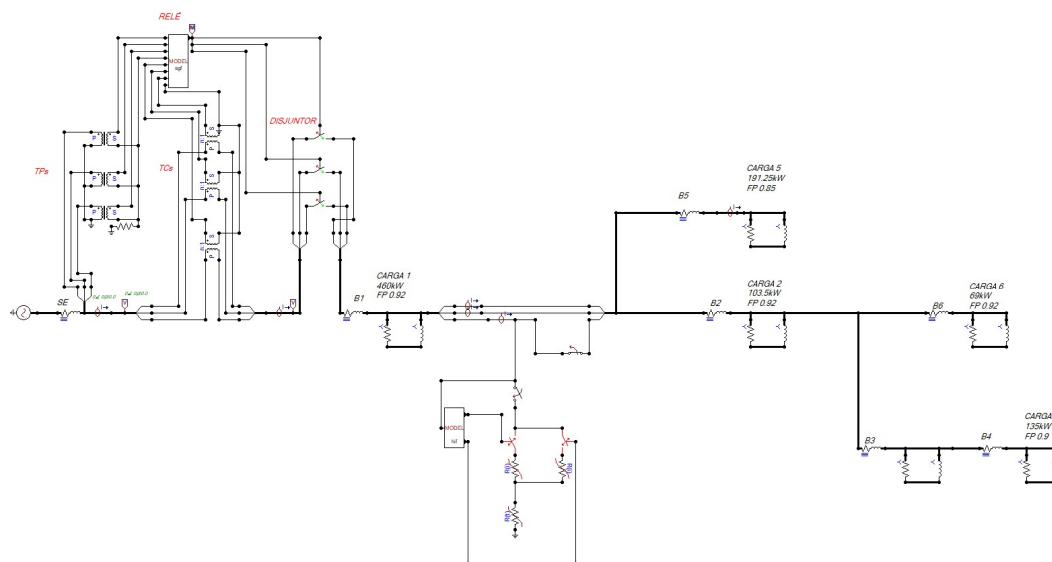
Fonte: o autor (2022).

A implementação do algoritmo da função SGF apresentou consistência em sua modelagem através das variáveis de sequência 0, detectando a FAI apenas na sua ocorrência e, neste caso, abrindo o circuito para proteção. O resultado para todos os estudos de caso são apresentados no subcapítulo que segue.

4.4 RESULTADOS DOS ESTUDOS DE CASOS

Após a modelagem do sistema de distribuição, da FAI e da função SGF do relé de proteção, foi aplicado a FAI em três pontos do sistema já especificados anteriormente, resultando em 9 casos. Todas as medições destes casos, foram extraídas do ponto onde está instalado o relé, conforme apontado na Figura 44. A Figura 62 mostra a modelagem completa do sistema de distribuição com a disposição do relé de proteção e uma FAI aplicada no ponto P1.

Figura 62 - Modelagem completa do sistema

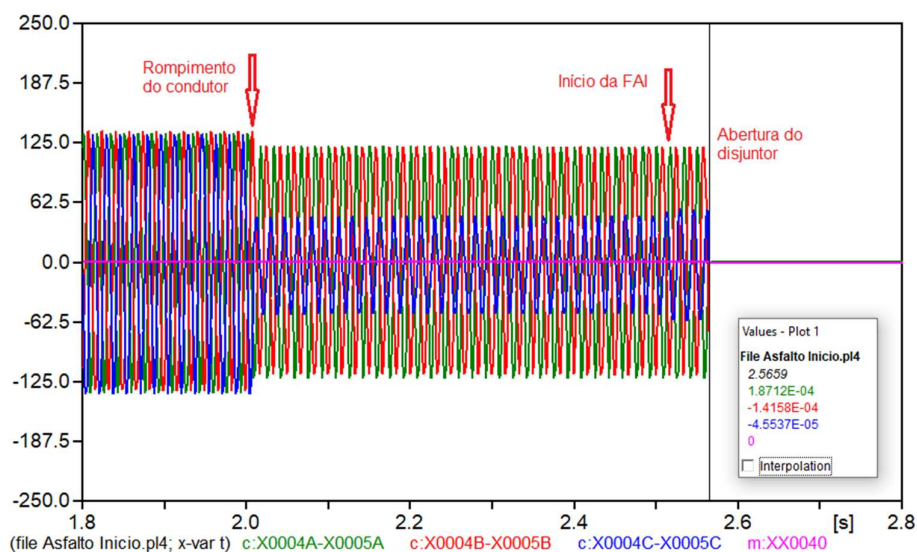


Fonte: o autor (2022).

4.4.1 Resultado CASO 1: Aplicação da FAI com solo do tipo asfalto no ponto P1.

A Figura 63 apresenta a curva de corrente vista pelo relé de proteção, quando aplicada a FAI de solo do tipo asfalto, no ponto P1 e também o momento de atuação do relé. Na Figura é demarcada a ocorrência de cada situação.

Figura 63 - Curva corrente trifásica FAI de solo do tipo asfalto, no ponto P1 com atuação do relé



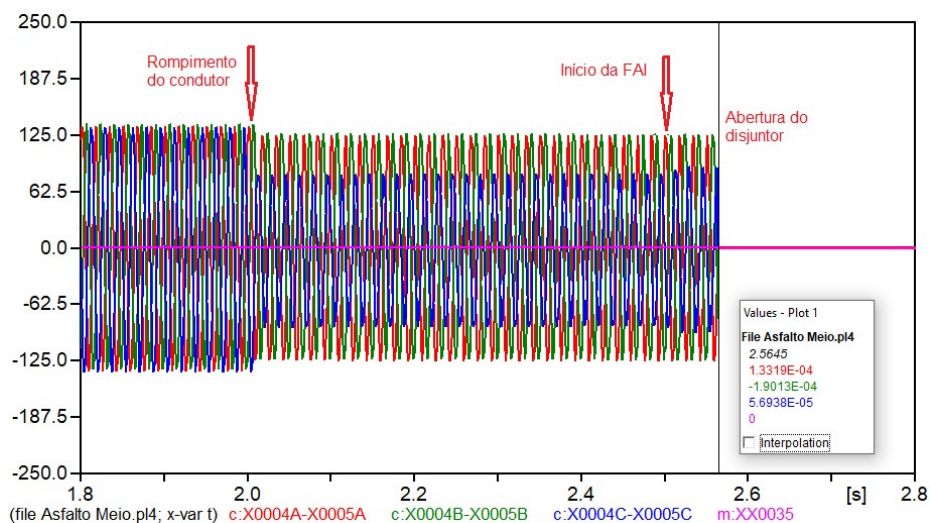
Fonte: o autor (2022).

Neste caso, a falta mais próxima ao relé gera uma redução de aproximadamente 60% na corrente da fase em falta. Nessa situação, uma proteção tradicional poderia interpretar a falta como uma variação de carga e manter o sistema energizado, porém a função SGF detecta a falta de alta impedância aos 2,56s, tardando 60ms após o início da FAI para enviar o sinal de *trip* para o disjuntor abrir o circuito e interromper o fornecimento de energia, atuando conforme esperado.

4.4.2 Resultado CASO 2: Aplicação da FAI com solo do tipo asfalto no ponto P2.

Para o caso 2, a mesma FAI do caso 1, é aplicada ao sistema de distribuição, porém no ponto intermediário P2. A Figura 64 apresenta a curva de corrente do sistema em falta e a atuação da função SGF.

Figura 64 - Curva corrente trifásica FAI de solo do tipo asfalto, no ponto P2



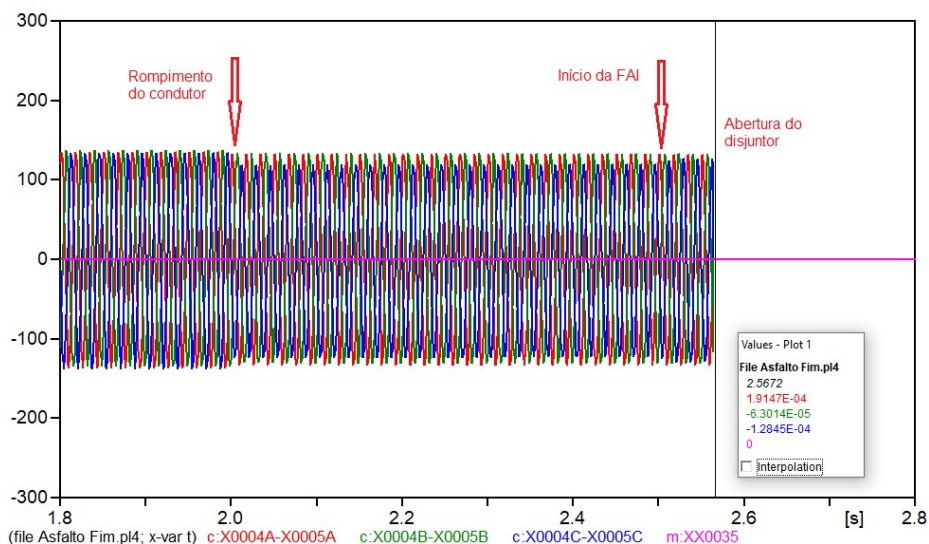
Fonte: o autor (2022).

Para o caso 2 a corrente da fase em falta teve uma redução aproximada de 45% no seu valor nominal e, igualmente ao caso 1, poderia ser interpretada como uma variação de carga pela proteção tradicional. A função SGF detecta a falha 60ms após o contato do condutor com o solo e envia sinal de abertura ao disjuntor.

4.4.3 Resultado CASO 3: Aplicação da FAI com solo do tipo asfalto no ponto P3.

No caso 3, a FAI para solo do tipo asfalto, é aplicada no ponto P3. Na Figura 65 é mostrada a curva de corrente resultante desta FAI e a atuação do relé de proteção.

Figura 65 - Curva corrente trifásica FAI de solo do tipo asfalto, no ponto P3



Fonte: o autor (2022).

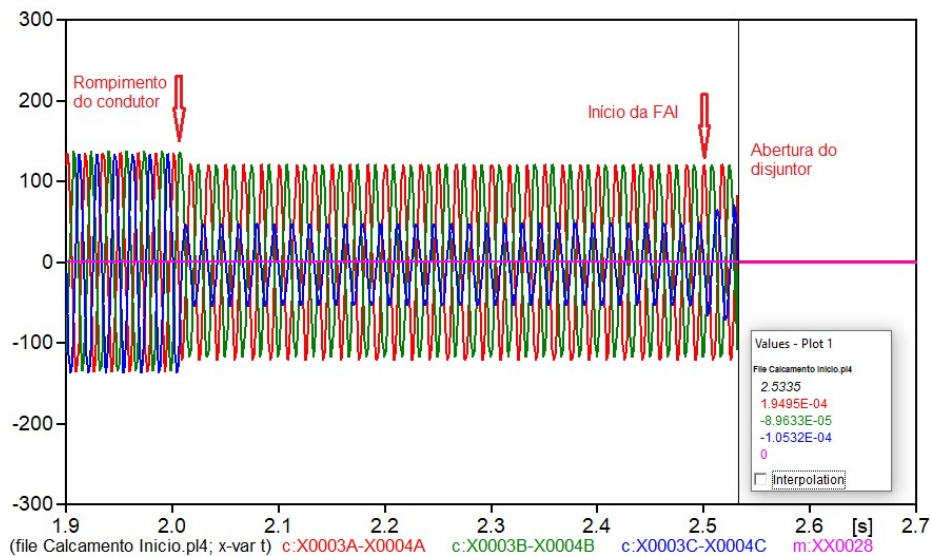
Neste caso onde a falta está no ponto mais distante do relé, a variação de corrente é menor que 10% do seu valor nominal. Igualmente aos 2 casos anteriores, após 60ms do início da FAI, a função SGF detecta a FAI e envia o sinal de *trip* para abertura do disjuntor.

4.4.4 Resultado CASO 4: Aplicação da FAI com solo do tipo calçamento no ponto P1.

No CASO 4 foi aplicada a FAI, de solo do tipo calçamento, no ponto P1 que é o mais próximo do relé. Neste caso houve uma redução de corrente próximo de 70% em relação a nominal e a abertura do disjuntor aconteceu em 30ms após o início da FAI. A Figura 66 apresenta a curva de corrente vista pelo relé e também o momento de abertura do disjuntor. Mesmo a FAI ocorrendo em um solo distinto dos três primeiros casos, a função SGF detectou a falta e enviou o comando de

abertura para o disjuntor.

Figura 66 – CASO 4: Curva corrente trifásica FAI de solo do tipo calçamento, no ponto P1

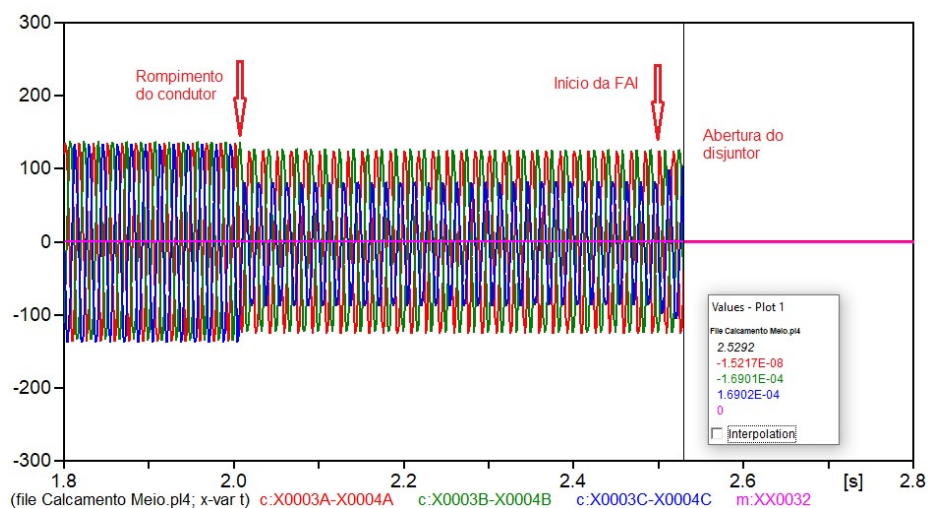


Fonte: o autor (2022).

4.4.5 Resultado CASO 5: Aplicação da FAI com solo do tipo calçamento no ponto P2.

O CASO 5 apresenta a FAI de solo do tipo calçamento no ponto intermediário P2. Novamente a corrente da fase em falta apresenta uma redução no seu valor e, apesar da FAI estar mais distante do relé, a função SGF atuou após 30ms do início da FAI. Na Figura 67 esta mostrada a curva de corrente deste caso.

Figura 67 - CASO 5: Curva corrente trifásica FAI de solo do tipo calçamento, no ponto P2

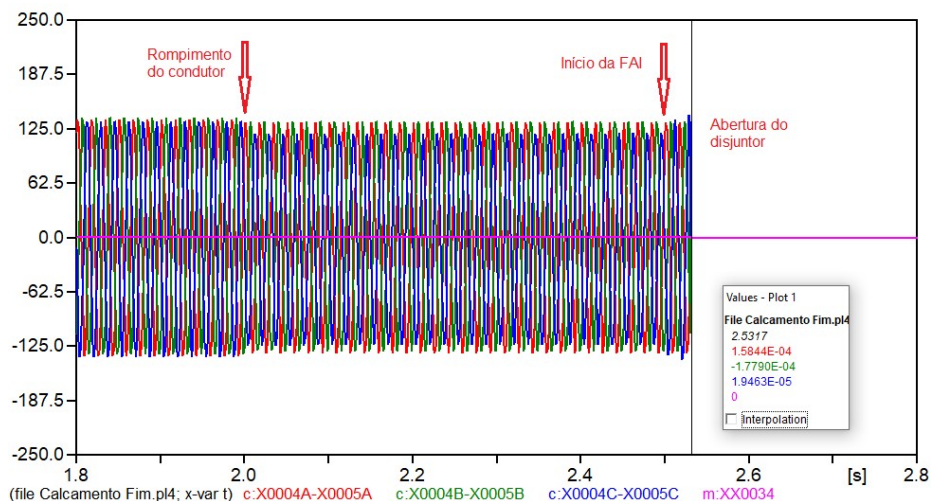


Fonte: o autor (2022).

4.4.6 Resultado CASO 6: Aplicação da FAI com solo do tipo calçamento no ponto P3.

Neste caso a mesma FAI do caso anterior é aplicada no ponto mais distante P3. Após o início da FAI, em 32ms houve a atuação do disjuntor, confirmando o funcionamento da função SGF. A Figura 68 apresenta a curva de corrente deste caso.

Figura 68 - CASO 6: Curva corrente trifásica FAI de solo do tipo calçamento, no ponto P3

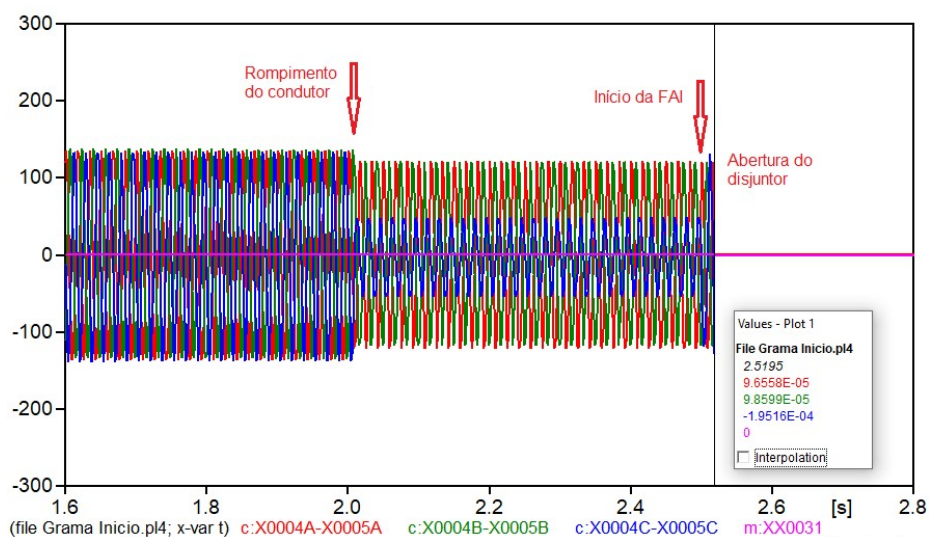


Fonte: o autor (2022).

4.4.7 Resultado CASO 7: Aplicação da FAI com solo do tipo grama no ponto P1.

Para este caso, foi aplicada a FAI de solo tipo grama no ponto P1. Desde o momento do rompimento do condutor até o tempo que antecede o contato com o solo, não estão presentes correntes e tensões de sequência zero. A partir do surgimento destas variáveis, que se dá quando o condutor toca o solo, a função SGF detecta estes sinais e envia sinal para interrupção da energização do sistema. Na Figura 69 está a curva de corrente deste caso e também o momento de abertura do disjuntor, que se dá 20ms após o início da FAI.

Figura 69 – CASO7: Curva corrente trifásica FAI de solo do tipo grama, no ponto P1

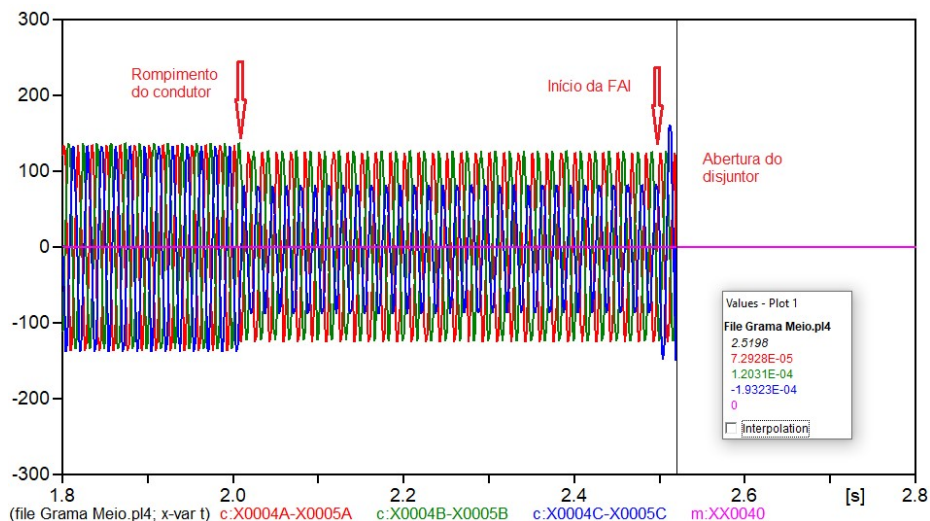


Fonte: o autor (2022).

4.4.8 Resultado CASO 8: Aplicação da FAI com solo do tipo grama no ponto P2.

Novamente a aplicação da FAI de solo tipo grama, porém aplicada no ponto intermediário P2 do sistema. Mesmo a FAI estando mais distante do relé em relação ao caso anterior, a proteção atua devidamente na ocorrência da falta. A Figura 70 apresenta a curva de corrente, do presente caso, com a abertura do disjuntor em 20ms após o início da FAI.

Figura 70 – CASO 8: Curva corrente trifásica FAI de solo do tipo grama, no ponto P2

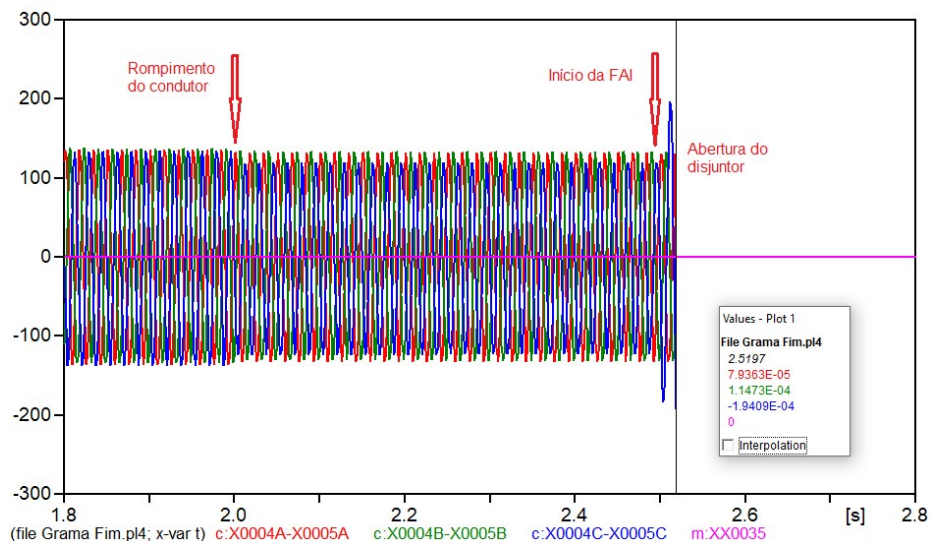


Fonte: o autor (2022).

4.4.9 Resultado CASO 9: Aplicação da FAI com solo do tipo grama no ponto P3.

No nono caso a FAI de solo do tipo grama foi aplicada no ponto P3. Mesmo a falta estando mais distante em relação ao relé, a função de proteção detectou a FAI e, 20ms após o início da falta, o circuito foi desenergizado. A curva de corrente deste caso esta mostarda na Figura 71.

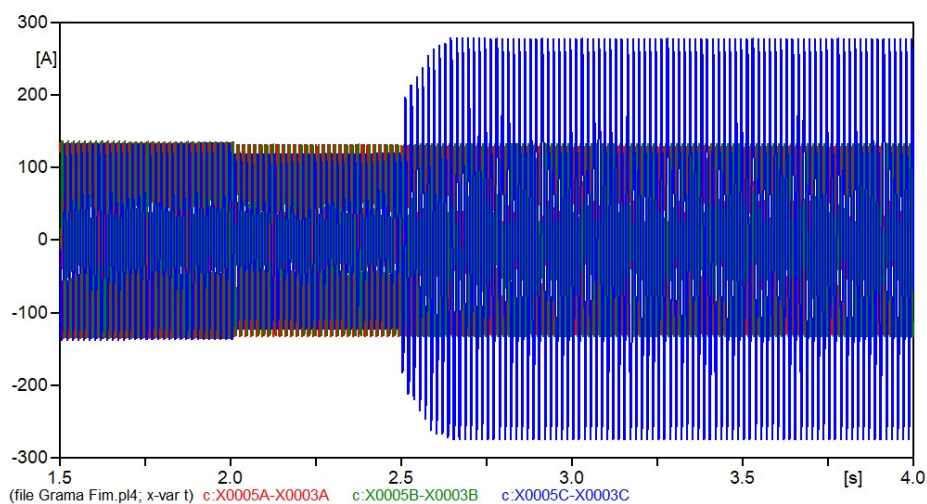
Figura 71 – CASO 9: Curva corrente trifásica FAI de solo do tipo grama, no ponto P3



Fonte: o autor (2022).

Para os CASOS 7, 8 e 9 é notória a elevação da corrente de falta em relação a corrente nominal. Como pode ser visto na Figura 72, a FAI de solo tipo grama sem atuação da proteção SGF gera uma sobrecorrente de 100% no sistema. Dependendo do ajuste de um relé tradicional de sobrecorrente, essa falta poderia ser detectada pelo mesmo. Visto que mesmo que a FAI gere uma sobrecorrente no sistema, a função SGF modelada atuou de forma correta interrompendo a energização do circuito, comprovando sua funcionalidade também para estes casos.

Figura 72 - FAI solo grama sem atuação da proteção



Fonte: o autor (2022).

A função SGF modelada neste trabalho atuou em todos os 9 casos propostos, interrompendo a energia do sistema somente e na ocorrência da FAI. Isso comprova que, dentro do sistema modelado, esta alternativa de detecção de FAI pode ser utilizada.

5 CONCLUSÃO

A complexidade dos sistemas de detecção de faltas de alta impedância continuará sendo um desafio para a engenharia e pesquisadores, afim de evitar os riscos que a mesma impõe para a população, aos animais e danos a equipamentos e materiais. Neste trabalho, foi possível entender o quão complexo é este propósito, apresentando uma abordagem sobre as características das faltas de alta impedância e também os métodos utilizados atualmente para sua devida detecção.

Através da modelagem computacional, primeiramente foi modelado um sistema de distribuição em rede de média tensão para posteriormente aplicar as faltas de alta impedância e a função SGF também modeladas. Este SDEE, apesar de ser simples, apresentou os principais elementos necessários para modelagem. As informações de corrente e tensão, extraídas da simulação do sistema sem falta, apresentaram os valores esperados diante das cargas e impedâncias descritas do sistema.

Baseado nas principais características das faltas de alta impedância que a literatura apresenta, foi possível reproduzir estas faltas, modeladas por software, para 3 tipos de solos distintos presentes em áreas urbanas. O modelo implementado utilizando resistências não-lineares e variante no tempo, apresentou resultado satisfatório, demonstrando as características presentes nas FAIs. Para cada tipo de solo que o condutor entra em contato, a falta apresenta suas características, porém de formas diferentes entre elas. Os gráficos extraídos de cada modelo puderam apresentar estas características, destacando a assertividade da simulação.

Após a inclusão de cada uma das FAIs modeladas no sistema de distribuição, foi necessário modelar uma função de detecção SGF para interromper o circuito, evitando assim que o condutor rompido seguisse energizado. O modelo utilizado foi baseado nas componentes simétricas da corrente e tensão de sequência zero da falta. A função foi implementada através do *MODELS*, onde os sinais recebidos dos transformadores de instrumentação foram tratados e toda a lógica de detecção foi desenvolvida. Como o sistema de distribuição modelado possui cargas equilibradas e não possuía variação de carga, foi possível fazer a detecção de todas as FAIs para todos os casos simulados. Em algumas situações de falta a atuação foi mais rápida que em outras, isso se deve as características

das faltas, para cada solo, não serem iguais e também pela magnitude da corrente de falta gerada, mas todas as detecções foram em tempos menores que 0,5 segundos após o início da falta. Para as condições de todo o conjunto simulado, a função SGF foi eficaz atuando quando necessário.

Diante de algumas simulações, como por exemplo a falta para o solo do tipo grama, dependendo das configurações do relé tradicional de sobrecorrente, o mesmo poderia detectar essa falta, visto que a corrente desta falta foi em torno de 100% maior do que a corrente nominal do circuito.

Dessa forma, através deste trabalho, foi possível cumprir os objetivos e aplicar um método de detecção SGF para a FAI no rompimento e queda de condutor de um sistema de média tensão de 13,8 kV. Também fica claro que cada FAI apresenta características diferentes entre elas e as variações intrínsecas do próprio circuito dificultam sua detecção. Logo, muitos relés comerciais com funções SGF incorporadas, utilizam mais de um método para poder detectar estas faltas.

Através dos resultados obtidos, deixa-se como propostas para trabalhos futuros:

- Modelar FAIs para outros tipos de solo, aplicando-as no sistema, afim de validar a função SGF modelada para outros casos;
- Simular o sistema com variações de carga, inserindo ou retirando cargas, e/ou chaveamento de banco de capacitores, para verificar se a função SGF modelada poderá atuar indevidamente nestas situações;
- Implementar outro método de função SGF ao mesmo sistema e, assim, poder destacar vantagens e desvantagens entre os modelos.

REFERÊNCIAS

ARIAS, Juan Camilo Garcia. **Identificação de Falhas de Alta Impedância em Redes Aéreas Multiaterradas**. Dissertação de mestrado em Ciências, Poli-USP. São Paulo, 2015.

COPEL, Companhia P. D. E. NTC 841001 **Projeto de Redes de Distribuição Urbana**. 1999.

DOS SANTOS, Wellinsílvio Costa. **Uma Revisão de Modelos Clássicos de Falhas de Alta Impedância para Efeito de Melhoramento**. Dissertação de Mestrado em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica, UFCG. Campina Grande, 2011.

EEL-USP, Escola de Engenharia de Lorena, **O Sistema Elétrico**. Disponível em: <https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5840834/59/SistemaEletrico1.pdf>. Acesso em: 17 de abril de 2022.

ELETROBRÁS. **Proteção de Sistemas Aéreos de Distribuição**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ:CAMPUS, 1982. 233 p. ISBN 8570010907.

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

FARIAS, Patrick Escalante. **Método para estimação da distância de falhas de alta impedância em redes de distribuição de energia elétrica considerando diferentes tipos de solo**. Tese de Doutorado, UFSM. Santa Maria, 2017.

FERREIRA, João Tiago Veríssimo. **Redes de Distribuição de Energia Elétrica de Média e Baixa Tensão – Estágio na Helenos, S.A**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica, ISEC. Coimbra, 2018.

FISCHER, Normann; HOU, Daqing. **Methods for Detecting Ground Faults in Medium-Voltage Distribution Power Systems**. Schweitzer Engineering Laboratories, Washington, 2006. 19 p.

GIGUER, S. **Proteção de Sistemas de Distribuição**. Porto Alegre: Sagra, 1988. 344p.

HOU, Daqing. **High-Impedance Fault Detection – Field Tests and Dependability Analysis**. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Washington, 2009. 11 p.

HOU, Daqing; FISCHER, Normann. **Deterministic High-Impedance Fault Detection and Phase Selection on Ungrounded Distribution Systems**. Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. Canadá, 2007. 11 p.

HAYES, Scott; HOU, Daqing; FISCHER, Normann. **Understanding Ground Fault Detection Sensitivity and Ways to Mitigate Safety Hazards in Power Distribution Systems**. 57th Annual Minnesota Power Systems Conference. Minnesota, 2021. 13 p.

IEEE. **Standard for Relays and Relay Systems Associated with Electric Power Apparatus**. IEEE Std C37.90-2005 (Revision of IEEE Std C37.90-1989), 2006, pp.1-25. doi: 10.1109/IEEESTD.2006.98985.

JUNIOR, Mozart Ferreira Braga. **Impacto da Geração Distribuída na Proteção de Sistema de Distribuição**. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica, UNIFEI. Itajubá, 2017.

KAGAN, Nelson; OLIVEIRA, Carlos C. B. D.; ROBBA, Ernesto J. **Introdução aos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 2^a ed. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 2010.

KERSTING, William H. **Distribution System Modeling and Analysis**. New York: CRC Press LCC, 2002.

KINDERMANN, G. **Curto-circuito**. 2. ed. Florianópolis, SC. 1997. ISBN 85-241-0368-X.

KINDERMANN, G. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. 2 ed. Florianópolis, SC. 2005. ISBN 85-900853-1-7.

KOTLINSKI, Eliseu. **Detecção de Falta de Alta Impedância em Sistema de Distribuição Radial Utilizando Redes Neurais Artificiais**. Dissertação de Mestrado em Modelagem Matemática, UNIJUÍ. Ijuí, 2013.

LEÃO, Ruth. **GTD – Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. 2009. Apostila - Universidade Federal do Ceará - Departamento de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2009.

LEITE, Marino Piazza. **Identificação e Localização de Faltas de Alta Impedância Utilizando Medidores Inteligentes**. Dissertação de Mestrado em Ciências de Engenharia Elétrica, UNIFEI. Itajubá, 2017.

LIMA, Danusia de Oliveira de. Notas de Aula – **Proteções de Sistemas Elétricos**. Departamento de Engenharia Elétrica da UCS, 2021. Caxias do Sul, 2021.

LOPES, H. C. **Análise da Propagação de Curtos-Circuitos no Alimentador Al-122 da Cidade de Porto Alegre**. Trabalho de conclusão de curso, UNIJUÍ. Ijuí, 2009.

MAEZONO, Paulo Koiti. **Filosofia de proteção de linhas de transmissão, barramentos, transformadores de potência e reatores “shunt”**. São Paulo: Virtus Consultoria & Serviços, Ltda., 2014.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 3. Ed. Rio de Janeiro, RJ, 2005. ISBN 85-216-1436-5.

MAMEDE FILHO, J; MAMEDE, D. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ, 2016. ISBN978-85-216-1884-3.

MOREIRA, Carlos. **Análise de Curto-Circuitos Simétricos**. 2009. Disponível em: <<https://paginas.fe.up.pt/~ee06226/images/bibliografia/17.pdf>> Acesso em: 23/04/2022.

MORETO, Miguel. **Localização de Falhas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição de Energia: Uma Metodologia Baseada em Redes Neurais Artificiais**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UFRGS. Porto Alegre, 2005.

NAKAGOMI, R. M. **Proposição de um Sistema para Simulação de Falhas de Alta Impedância em Redes de Distribuição**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Poli-USP. São Paulo, 2006.

NAM, S. R. et al. **A modeling method of a high impedance fault in a distribution system using two series time-varying resistances in EMTP**. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2001. p. 1175-1180.

PEREIRA, J. A.; CHUERI, I. J.; LANGNER, C. G.; VALENÇA, M. M. **Equipamentos Identificadores de Fases Para Redes de Baixa Tensão**. LACTEC – COPEL. Paraná, 2000.

RUSSELL, B. D., AUCCOIN, M. **Distribution high impedance fault detection utilizing high frequency current components**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982. 11 p.

SANTOS, Moises M. **Estudo de caso – Análise do fluxo de potência em um sistema de distribuição utilizando a topologia anel**. Trabalho de conclusão de curso, UNIJUÍ. Ijuí, 2005.

SCADAMINER. **Unexpected Sources of Zero Sequence Current: the Need for Directional Sensitive Earth Fault to Discriminate Upstream Faults**. 2017. Disponível em: < <https://www.scadaminer.com/sensitive-earth-fault-trip/>> Acesso em: 01/05/2022.

SIEMENS. **Manual Técnico 7SR11 e 7SR12 Argus: Relé de Sobrecorrente**. Siemens Protection Devices. Reino Unido, 2017.

SILVA, Márcio Gabriel Melo. **Avaliação de Desempenho de Relés de Proteção Digitais**. Trabalho de conclusão de curso, UFRJ. Rio de Janeiro, 2012.

SHORT, T. A., **Electric Power Distribution Handbook**. Boca Raton: CRC Press, 2004. 365 p. ISBN 0-8493-1791-6.

TEJADA, Hernan Sebastian Oviedo. **Formulação Estendida Baseada na Impedância Aparente para Localização de Falhas em Sistemas de Distribuição Rurais**: Uma Análise da Influência de Falhas de Alta Impedância. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UFRGS. Porto Alegre, 2012.

VARGAS, Murillo Cobe. **Análise dos Impactos das Falhas na Proteção Sobrecorrente em Redes de Distribuição com Elevada Penetração de Geração Distribuída Fotovoltaica**. Dissertação de Mestrado, UFES. Vitória, 2018.

VYSHNAVI, Gogula; PRASAD, Avagaddi. **Detection and Location of High Impedance Faults in Distribution Systems: A Review**. International Journal of Advanced Science and Technology, Vol. 119, pp. 53-66. Austrália, 2018.

**APÊNDICE A – VALORES OBTIDOS ATRAVÉS DAS CURVAS DE TENSÃO
x CORRENTE E RESISTÊNCIA x TEMPO DE CADA UM DOS SOLOS**

Tabela 8 - Valores da curva tensão x corrente do solo tipo asfalto

Resistência Ascendente		Resistência Descendente	
Corrente [A]	Tensão [V]	Corrente [A]	Tensão [V]
-6,4793	-7507,8108	-6,8464	-7829,8744
-5,8728	-6880,3628	-6,2514	-7802,6648
-5,3199	-6413,3773	-5,6273	-7655,5803
-4,8289	-6054,0887	-5,0847	-7149,8093
-4,2505	-5535,8516	-4,4665	-6756,3291
-3,6552	-4913,8455	-3,8716	-6546,0726
-3,0603	-4480,611	-3,2766	-6343,2368
-2,4924	-4160,114	-2,6817	-6145,3483
-2,276	-3411,0187	-2,0867	-5937,5653
-1,7081	-2830,7153	-1,4917	-5484,8953
-1,1131	-2306,3107	-1,1131	-5291,1294
-0,5602	-1660,1496	-0,7832	-3105,8039
-0,1017	-516,0131	-0,5452	-123,3256
-0,0461	1345,7929	-0,2748	700,0012
0,4374	2169,9359	0,185	1013,6754
0,6177	3382,278	0,6717	1716,8732
0,834	4122,122	1,0774	2282,2298
1,1585	5304,9772	1,5371	2836,671
1,6081	5992,7061	2,1321	3469,561
2,1862	6432,9418	2,5648	3914,8102
2,7811	6631,3251	2,9975	4473,8453
3,3761	6873,2438	3,5924	5112,0358
3,971	7061,2379	4,1874	5567,1795
4,566	7226,4749	4,6742	6206,4694
5,161	7377,8596	5,2691	6843,5605

Fonte: o autor (2022).

Tabela 9 - Valores da curva resistência x tempo do solo tipo asfalto

Tempo [s]	Resistência [Ω]
0	14031,06
0,0022	12426,8946
0,0029	10422,1995
0,0054	8016,0116
0,0068	5844,0378
0,009	4239,752
0,0112	3236,8025
0,0155	1765,4247
0,0187	1163,0049
0,0245	760,1878
0,0339	1091,1335
0,045	1454,8847
0,0555	1384,5783
0,0634	1114,6692
0,0724	810,9914
0,0807	707,9998
0,0901	704,8697
0,1009	801,4808
0,115	963,8235
0,1294	959,008
0,1449	853,6086
0,156	816,469
0,1679	779,0887
0,1852	806,7176
0,1996	634,8643

Fonte: o autor (2022).

Tabela 10 - Valores da curva tensão x corrente do solo tipo calçamento

Resistência Ascendente		Resistência Descendente	
Corrente [A]	Tensão [V]	Corrente [A]	Tensão [V]
-19,1387	-7543,8279	-18,558	-7577,1009
-17,6833	-7047,883	-17,2383	-7209,2634
-15,3342	-6544,6734	-15,9188	-6773,0041
-13,8803	-5950,2476	-14,599	-6429,7984
-12,6979	-5571,5765	-13,2792	-6064,6978
-10,762	-4820,0641	-11,9603	-5510,7529
-9,4428	-4323,5936	-10,6408	-5074,4936
-8,1236	-3839,8952	-9,321	-4734,0248
-6,8037	-3505,8124	-8,002	-4193,7644
-5,46	-3114,9653	-6,6827	-3710,9782
-3,1001	-2000,1002	-5,3637	-3170,7177
0,3011	1020,0023	-4,0451	-2526,4561
3,3826	2124,1975	-2,726	-2021,7750
4,7148	2705,218	-1,407	-1481,5145
5,6611	3017,7647	-0,5267	-470,8744
7,2371	3657,3135	0,2664	490,4295
8,7785	4351,024	1,2251	1037,1419
9,9782	4707,8144	2,4239	1589,7098
11,2972	5237,1273	3,7431	2094,3909
12,7192	5764,9619	5,0623	2583,1982
13,9358	6180,8047	6,3812	3158,4907
15,255	6675,0857	7,6403	3666,6799
16,5744	7123,5697	8,8995	4148,5951
17,8045	7391,6647	10,2192	4513,6958
18,8092	7667,7216	18,975	7665,8900

Fonte: o autor (2022).

Tabela 11 - Valores da curva resistência x tempo do solo tipo calçamento

Tempo [s]	Resistência [Ω]
0	1325,1
0,0009	1234,4
0,0014	1153,4
0,0018	1088,6
0,0045	1001,2
0,0077	813,3
0,0104	729,11
0,0172	541,32
0,0226	460,41
0,0285	398,95
0,0489	344,2
0,0593	321,69
0,0692	286,22
0,0787	237,78
0,0959	147,34
0,114	63,402
0,1222	40,856
0,1308	21,557
0,1389	11,969
0,157	15,502
0,1656	18,881
0,1751	35,234
0,1842	38,62
0,1928	45,239
0,2023	38,914

Fonte: o autor (2022).

Tabela 12 - Valores da curva tensão x corrente do solo tipo grama

Resistência Ascendente		Resistência Descendente	
Corrente [A]	Tensão [V]	Corrente [A]	Tensão [V]
-62,4683	-6944,6307	-58,1398	-6758,8305
-54,5554	-6088,5067	-52,9528	-6338,5252
-48,9463	-5627,1931	-47,9447	-5872,7219
-43,3818	-5106,6719	-42,9366	-5420,1836
-37,9285	-4609,7471	-37,4276	-4970,1962
-32,4195	-4054,9157	-32,1691	-4414,1403
-26,9106	-3491,6661	-27,161	-3883,7980
-22,4033	-3152,8637	-22,6537	-3470,5730
-17,2699	-2621,9201	-17,8959	-2931,4777
-11,5356	-1939,2096	-12,6374	-2360,9580
-4,5811	205,002	-7,7127	-1706,4482
7,3951	1970,1708	-3,6806	-889,4038
12,6537	2658,927	-0,1171	302,5790
18,1626	3219,1154	4,3902	1194,3874
23,1707	3652,3941	8,1463	1609,3937
27,9285	4101,6418	12,4533	2220,1893
33,187	4672,3911	17,3613	2731,5908
38,6959	5084,4969	22,6699	3131,8730
42,9528	5472,1136	28,1789	3627,7775
49,839	6055,0692	33,6878	4295,8710
55,4374	6472,6687	39,1967	4761,9294
59,5631	6760,0878	64,21	6876,0000

Fonte: o autor (2022).

Tabela 13 - Valores da curva resistência x tempo do solo tipo grama

Tempo [s]	Resistência [Ω]
0	210,44
0,0007	188,07
0,0018	173,17
0,0029	159,98
0,0043	145,07
0,0058	129,59
0,0083	115,25
0,0097	100,92
0,014	86,583
0,018	73,394
0,0227	66,514
0,0288	60,78
0,0374	55,619
0,0446	48,739
0,0532	40,711
0,0619	30,39
0,0727	22,362
0,0845	17,202
0,0953	13,761
0,1072	13,761
0,1209	12,041
0,1335	10,321
0,1425	8,6009
0,1498	8,6009
0,1572	8,6009

Fonte: o autor (2022).

APÊNDICE B – CÓDIGO MODELS DA FUNÇÃO SGF DO RELÉ DE PROTEÇÃO

```

MODEL SGF
DATA freq -- frequência
    xrms_ini {dflt:-1} -- Valor rms inicial (default = 1)
    scale {dflt:1}
    SampleFreq {dflt:400}
    Algorithm {dflt:0}
INPUT I[1..4]
    V[1..4]
OUTPUT trip
VAR
    trip,aux,cont
    xrms[1..4] -- valor rms do sinal
    x2[1..4] -- interno, x*x
    ix2[1..4] -- interno, integral of x2
    period -- 1/freq
    n
    isoma
    SEQrei[1..3],SEQimi[1..3],rei[1..3],
    imi[1..3],OMEGA,NSAMPL,alpha,D,i,delta_T[0..7],Mod_Seqi[1..3] --
    variáveis de controle do código - corrente
    SEQrev[1..3],SEQimv[1..3],rev[1..3],Mod_Seqv[1..3] -- variáveis de
    controle do código - tensão
    x1,x3,x5,x7,xre,xim
    TIMESTEP min:recip(SampleFreq)
    DELAY CELLS(x2[1..4]): 1--/timestep +1 --atraso de tempo dos valores de
    uma iteração anterior
    DELAY CELLS(ix2[1..4]): 1--/freq/timestep +1
    HISTORY X[1..3] {DFLT:0} -- grava os valores de X a cada iteração
INIT
    period := recip(freq)
    histdef(ix2[1..4]) := 0 -- define os valores iguais a zero
    integral(x2[1..4]) := 0
    isoma:=0
    trip:=1
    aux:=0
    cont:=0
    IF xrms_ini <0 THEN xrms[1..4]:=0 ELSE xrms[1..4]:=xrms_ini ENDIF --
    define os valores iniciais da componente RMS
    FOR i:= 0 TO 7 DO -- iteração para amostragem dos fasores
    delta_T[i] := i--/(FREQ*8) --define o intervalo de tempo da amostragem
    ENDFOR
    alphas:=1/sqrt(2)
    OMEGai:=2*PI*FREQ
    NSAMPLi:=recip(FREQ*timestep)
    if abs(NSAMPLi-trunc(NSAMPLi))>1e-9 then
        write('%%WARNING in ABC2SEQ: SAMPLEFREQ/FREQ is not an integer
    number')
    endif
    rei[1..3] :=0
    imi[1..3] :=0
    rev[1..3] :=0
    imv[1..3] :=0
ENDINIT
EXEC
    isoma:=I[1]+I[2]+I[3] --soma das correntes
    FOR n:=1 TO 3 DO

```

```

    x2[n] := I[n]*I[n] --valor ao quadrado
    ix2[n] := integral(x2[n]) --integral do valor ao quadrado
IF t>period THEN
    xrms[n] := sqrt((ix2[n] - delay(ix2[n], period))*freq)*scale --cálculo
do valor RMS
ENDIF
ENDFOR
    x2[4]:=isoma*isoma
    ix2[4]:=integral(x2[4])
    if t>period then
    xrms[4]:= sqrt((ix2[4] - delay(ix2[4], period))*freq)*scale
endif
for i:=1 to 3 do
if Algorithm =0 --Definição do algoritmo da Transformada de Fourier
utilizado
then
    x1 := delay(I[i],delta_T[0],1) - delay(I[i],delta_T[4],1)
    x3 := delay(I[i],delta_T[2],1) - delay(I[i],delta_T[6],1)
    x5 := delay(I[i],delta_T[1],1) - delay(I[i],delta_T[5],1)
    xre := x1 + (x5 - x7)*alpha
    xim := x3 + (x5 + x7)*alpha
    rei[i] := (xre*cos(OMEGA*T)+xim*sin(OMEGA*T))/4*Scale --janela
flutuante para amostragem dos valores de fasores..
    imi[i] := (xim*cos(OMEGA*T)-xre*sin(OMEGA*T))/4*Scale
else --DFT janela recursiva, variáveis de amostragem dos sinais, retorna
valor real e imaginário
    x7:=delay(X[i],1/2,2)
    D:=2/NSAMPL*(X[i]-x7)*cos(OMEGA*T)
    rei[i]:=rei[i]+D*Scale
    D:=2/NSAMPL*(X[i]-x7)*sin(OMEGA*T)
    imi[i]:=imi[i]-D*Scale
endif
endfor
isoma:=V[1]+V[2]+V[3] --soma das tensoes
FOR n:=1 TO 3 DO
    x2[n] := V[n]*V[n] --valor ao quadrado
    ix2[n] := integral(x2[n]) --integral do valor ao quadrado
IF t>period THEN
    xrms[n] := sqrt((ix2[n] - delay(ix2[n], period))*freq)*scale --cálculo
do valor RMS
ENDIF
ENDFOR
    x2[4]:=isoma*isoma
    ix2[4]:=integral(x2[4])
    if t>period then
    xrms[4]:= sqrt((ix2[4] - delay(ix2[4], period))*freq)*scale
endif
for i:=1 to 3 do
if Algorithm =0 --Definição do algoritmo da Transformada de Fourier
utilizado
then
    x1 := delay(V[i],delta_T[0],1) - delay(V[i],delta_T[4],1)
    x3 := delay(V[i],delta_T[2],1) - delay(V[i],delta_T[6],1)
    x5 := delay(V[i],delta_T[1],1) - delay(V[i],delta_T[5],1)
    xre := x1 + (x5 - x7)*alpha
    xim := x3 + (x5 + x7)*alpha
    rev[i] := (xrev*cos(OMEGA*T)+ximv*sin(OMEGA*T))/4*Scale --janela
flutuante para amostragem dos valores de fasores..
    imv[i] := (ximv*cos(OMEGA*T)-xrev*sin(OMEGA*T))/4*Scale
else --DFT janela recursiva, variáveis de amostragem dos sinais, retorna
valor real e imaginário

```

```

x7:=delay(X[i],1/2,2)
D:=2/NSAMPL*(X[i]-x7)*cos(OMEGA*T)
rev[i]:=rei[i]+D*Scale
D:=2/NSAMPL*(X[i]-x7)*sin(OMEGA*T)
imv[i]:=imi[i]-D*Scale
endif
endfor -- Cálculo dos valores das componentes de sequência e do módulo das
respectivas componentes.
--corrente
SEQrei[1]:=1/3*(rei[1]+rie[2]+rei[3]) --0 zero
SEQimi[1]:=1/3*(imi[1]+imi[2]+imi[3])
SEQrei[2]:=1/3*(rei[1]-0.5*rei[2]-0.5*rei[3]-sqrt(3)/2*(imi[2]-imi[3])) --1
pos
SEQimi[2]:=1/3*(imi[1]-0.5*imi[2]-0.5*imi[3]+sqrt(3)/2*(rei[2]-rei[3]))
SEQrei[3]:=1/3*(rei[1]-0.5*rei[2]-0.5*rei[3]+sqrt(3)/2*(imi[2]-imi[3])) --2
neg
SEQimi[3]:=1/3*(imi[1]-0.5*imi[2]-0.5*imi[3]-sqrt(3)/2*(rei[2]-rei[3]))
Mod_seqi[1]:=sqrt(Seqrei[1]*Seqrei[1]+Seqimi[1]*Seqimi[1])/sqrt(2)
Mod_seqi[2]:=sqrt(Seqrei[2]*Seqrei[2]+Seqimi[2]*Seqimi[2])/sqrt(2)
Mod_seqi[3]:=sqrt(Seqrei[3]*Seqrei[3]+Seqimi[3]*Seqimi[3])/sqrt(2)
--tensão
SEQrev[1]:=1/3*(rev[1]+rev[2]+rev[3]) --0 zero
SEQimv[1]:=1/3*(imv[1]+imv[2]+imv[3])
SEQrev[2]:=1/3*(rev[1]-0.5*rev[2]-0.5*rev[3]-sqrt(3)/2*(imv[2]-imv[3])) --1
pos
SEQimv[2]:=1/3*(imv[1]-0.5*imv[2]-0.5*imv[3]+sqrt(3)/2*(rev[2]-rev[3]))
SEQrev[3]:=1/3*(rev[1]-0.5*rev[2]-0.5*rev[3]+sqrt(3)/2*(imv[2]-imv[3])) --2
neg
SEQimv[3]:=1/3*(imv[1]-0.5*imv[2]-0.5*imv[3]-sqrt(3)/2*(rev[2]-rev[3]))
Mod_seqv[1]:=sqrt(Seqrev[1]*Seqrev[1]+Seqimv[1]*Seqimv[1])/sqrt(2)
Mod_seqv[2]:=sqrt(Seqrev[2]*Seqrev[2]+Seqimv[2]*Seqimv[2])/sqrt(2)
Mod_seqv[3]:=sqrt(Seqrev[3]*Seqrev[3]+Seqimv[3]*Seqimv[3])/sqrt(2)

if (Mod_seqi[1] > 0 and Mod_seqv[1] > 0 and (SEQimi[1] - SEQimv[1]) >= 90
and aux = 0) then
    trip:=0
    aux:=1
endif
ENDEXEC
ENDMODEL

```

APÊNDICE C – VALORES DE TENSÃO E CORRENTE DE SEQUÊNCIA 0 OBTIDOS ATRAVÉS DAS PONTAS DE PROVAS DE CADA UM DOS SOLOS

Tabela 14 - Valores de sequência 0 extraídos das ponteiros de prova, FAI solo tipo asfalto

Solo Asfalto												
		Ponto P1										
		Tempo (s)										
		Sistema sem falta			Tempo durante queda do condutor			Ocorrência da FAI				
		1	1,9	2,1	2,3	2,4	2,5	2,55	2,6	2,7	3	4
Corrente (A)	Seq 0	0L 119	0L 119	0L 119	0L 120	0L 120	0L 163	3L 120	3L 120	3L 120	3L 120	3L 120
Tensão (V)	Seq 0	0L 134	0L 145	0L-11	0L 118	0L 127	0L-17	4L 13	6L 3	6L 4	6L 4	6L 1
Defasagem angular (°)		-15	-26	130	2	-7	180	107	117	116	116	119
Ponto P2												
		Tempo (s)										
		Sistema sem falta			Tempo durante queda do condutor			Ocorrência da FAI				
		1	1,9	2,1	2,3	2,4	2,5	2,55	2,6	2,7	3	4
Corrente (A)	Seq 0	0L 119	0L 118	0L 120	0L 120	0L 119	0L 163	3L 119	3L 120	3L 120	3L 120	3L 120
Tensão (V)	Seq 0	0L 134	0L 145	0L-19	0L-6	0L-24	0L-17	4L 12	6L 5	6L 2	5L 8	6L 0
Defasagem angular (°)		-15	-27	139	126	143	180	107	115	118	112	120
Ponto P3												
		Tempo (s)										
		Sistema sem falta			Tempo durante queda do condutor			Ocorrência da FAI				
		1	1,9	2,1	2,3	2,4	2,5	2,55	2,6	2,7	3	4
Corrente (A)	Seq 0	0L 119	0L 119	0L 119	0L 119	0L 119	0L 163	3L 119	3L 119	3L 119	3L 120	3L 119
Tensão (V)	Seq 0	0L 120	0L 144	0L-24	0L 91	0L 125	0L-17	4L 11	6L 1	5L 8	5L-5	6L 0
Defasagem angular (°)		-1	-25	143	28	-6	180	108	118	111	125	119

Fonte: o autor (2022).

Tabela 15 - Valores de sequência 0 extraídos das ponteiros de prova, FAI solo tipo calçamento

Solo Calçamento												
		Ponto P1										
		Tempo (s)										
		Sistema sem falta			Tempo durante queda do condutor			Ocorrência da FAI				
		1	1,9	2,1	2,3	2,4	2,51	2,55	2,6	2,7	3	4
Corrente (A)	Seq 0	0L 119	0L 119	0L 119	0L 120	0L 120	4L 126	8L 119	10L 120	14L 120	15L 120	15L 121
Tensão (V)	Seq 0	0L 134	0L 145	0L-11	0L 118	0L 127	6L-8	11L 5	18L 9	29L 13	27L 10	26L 8
Defasagem angular (°)		-15	-26	130	2	-7	134	114	111	107	110	113
Ponto P2												
		Tempo (s)										
		Sistema sem falta			Tempo durante queda do condutor			Ocorrência da FAI				
		1	1,9	2,1	2,3	2,4	2,51	2,55	2,6	2,7	3	4
Corrente (A)	Seq 0	0L 119	0L 118	0L 120	0L 119	0L 119	4L 126	8L 119	10L 119	14L 119	14L 119	14L 120
Tensão (V)	Seq 0	0L 134	0L 145	0L-19	0L-6	0L-24	6L-8	11L 5	19L 9	28L 12	28L 10	25L 9
Defasagem angular (°)		-15	-27	139	125	143	134	114	110	117	119	111
Ponto P3												
		Tempo (s)										
		Sistema sem falta			Tempo durante queda do condutor			Ocorrência da FAI				
		1	1,9	2,1	2,3	2,4	2,51	2,55	2,6	2,7	3	4
Corrente (A)	Seq 0	0L 119	0L 118	0L 119	0L 119	0L 119	4L 126	8L 119	10L 118	14L 118	14L 119	14L 120
Tensão (V)	Seq 0	0L 134	0L 145	0L 0	0L 123	0L 103	6L-8	11L 5	19L 8	27L 11	29L 10	25L 8
Defasagem angular (°)		-15	-27	119	-4	16	134	114	110	107	109	112

Fonte: o autor (2022).

Tabela 16 - Valores de sequência 0 extraídos das ponteiros de prova, FAI solo tipo grama

Solo Grama												
		Ponto P1										
		Tempo (s)										
		Sistema sem falta		Tempo durante queda do condutor			Ocorrência da FAI					
		1	1,9	2,1	2,3	2,4	2,51	2,55	2,6	2,7	3	4
Corrente (A)	Seq 0	0L_119	0L_119	0L_119	0L_120	0L_120	22L_126	36L_118	50L_118	54L_118	54L_118	55L_119
Tensão (V)	Seq 0	0L_134	0L_145	0L_11	0L_118	0L_127	30L_8	68L_11	96L_11	103L_10	105L_10	102L_8
Defasagem angular (°)		-15	-26	130	2	-7	134	107	107	108	108	111
		Ponto P2										
		Tempo (s)										
		Sistema sem falta		Tempo durante queda do condutor			Ocorrência da FAI					
		1	1,9	2,1	2,3	2,4	2,51	2,55	2,6	2,7	3	4
Corrente (A)	Seq 0	0L_119	0L_118	0L_120	0L_119	0L_119	22L_126	36L_117	49L_116	53L_116	53L_116	53L_118
Tensão (V)	Seq 0	0L_134	0L_145	0L_19	0L_6	0L_24	30L_7	65L_11	91L_10	100L_9	100L_9	100L_7
Defasagem angular (°)		-15	-27	139	125	143	133	106	106	107	107	111
		Ponto P3										
		Tempo (s)										
		Sistema sem falta		Tempo durante queda do condutor			Ocorrência da FAI					
		1	1,9	2,1	2,3	2,4	2,51	2,55	2,6	2,7	3	4
Corrente (A)	Seq 0	0L_119	0L_118	0L_119	0L_119	0L_119	21L_125	35L_116	48L_115	51L_115	51L_115	52L_117
Tensão (V)	Seq 0	0L_134	0L_145	0L_0	0L_123	0L_103	29L_8	63L_10	88L_9	97L_8	98L_9	98L_7
Defasagem angular (°)		-15	-27	119	-4	16	133	106	106	107	106	110

Fonte: o autor (2022).