



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**MODELAGEM, SIMULAÇÃO E DETECÇÃO
DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA
EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

Gabriel Assunção Gonçalves Almeida

Brasília, Dezembro de 2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
**MODELAGEM, SIMULAÇÃO E DETECÇÃO
DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA
EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

Gabriel Assunção Gonçalves Almeida

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

Banca Examinadora

Prof. Kleber Melo e Silva, ENE/UnB
Orientador

Prof. Francis Arody Moreno Vásquez, ENE/UnB
Examinador Interno

Prof. Amauri Gutierrez Martins Britto, ENE/UnB
Examinador Interno

FICHA CATALOGRÁFICA

ALMEIDA, GABRIEL A. G.

MODELAGEM, SIMULAÇÃO E DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO [Distrito Federal] 2023.

xvi, 68 p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Engenheiro, Engenharia Elétrica, 2023).

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

Departamento de Engenharia Elétrica

- | | |
|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 1. Proteção de sistemas elétricos | 2. Distribuição de energia elétrica |
| 3. Falta de alta impedância | 4. Algoritmo de detecção |
| I. ENE/FT/UnB | II. Título (série) |

Referências Bibliográficas

ALMEIDA, GABRIEL A. G. (2023). *MODELAGEM, SIMULAÇÃO E DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO*. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 68 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Gabriel Assunção Gonçalves Almeida

TÍTULO: MODELAGEM, SIMULAÇÃO E DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO.

GRAU: Engenheiro Eletricista ANO: 2023

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Projeto Final de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Projeto Final de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Gabriel Assunção Gonçalves Almeida

Depto. de Engenharia Elétrica (ENE) - FT

Universidade de Brasília (UnB)

Campus Darcy Ribeiro

CEP 70919-970 - Brasília - DF - Brasil

Agradecimentos

Em primeiro lugar, a Deus, por seu amor e zelo. Por me proporcionar força, saúde e perseverança todos os dias da minha vida.

À minha família, pelo apoio, cuidado e suporte. Agradeço à minha avó Hilda e ao meu avô João pelo investimento na minha educação, pelo carinho e criação. À minha madrinha Gláucia pelo constante incentivo aos meus estudos. À minha mãe Graziella, que me ensinou desde a infância o caminho pelo qual eu deveria seguir. E a todos os meus familiares que contribuíram para a minha formação e meu caráter.

Aos meus amigos da juventude Unidos da ADTAG, em especial, ao grupo de jovens "G5". Obrigado por me proporcionarem momentos de felicidade e descontração. Certamente, a reta final da vida universitária tornou-se facilitada pela nossa comunhão.

Ao professor Kleber Melo, pela atenção e solicitude durante a orientação no TCC e pelas recomendações profissionais na área da Engenharia Elétrica, em especial, em Sistemas Elétricos de Potência.

Aos colaboradores do Departamento de Processos de Redes da Neoenergia Brasília pelas experiências, inspirações de carreira e ensinamentos, os quais, decerto, contribuíram para a elaboração deste trabalho.

A todos que direta ou indiretamente participaram da minha educação, o meu sincero agradecimento.

Gabriel Assunção Gonçalves Almeida

RESUMO

Neste trabalho, é avaliado o desempenho de um algoritmo de detecção de Falta de Alta Impedância (FAI) em um sistema de distribuição simulado. Para tanto, foi conduzida uma análise em um alimentador aéreo real que pertence à Neoenergia Brasília. Inicialmente, ocorre uma descrição detalhada das características da rede de distribuição estudada. Isso inclui informações essenciais como a tensão primária em que a rede opera, sua extensão total em quilômetros e os tipos de arranjos de cabos presentes no alimentador. Posteriormente, fez-se a coleta de dados específicos sobre o circuito, tal como a localização dos transformadores, a potência nominal de cada transformador e o comprimento de cada trecho da rede. Uma vez coletados, o circuito de distribuição é modelado usando o software ATP (*Alternative Transients Program*), amplamente utilizado para simular o comportamento transitório de sistemas elétricos. A modelagem envolve a representação detalhada dos componentes da rede, além de permitir um modelo computacional da falta de alta impedância o qual visa representar, com elevado detalhamento, a natureza do evento. Decerto, a descrição do circuito usando o software ATP é fundamental para realizar simulações com o mote de avaliar o algoritmo de detecção analisado.

Palavras-chave: Proteção de sistemas de distribuição, análise de transitórios eletromagnéticos, modelagem de alimentador, diagnóstico de faltas, faltas de alta impedância, algoritmo de detecção.

ABSTRACT

In this work, the performance of a High-Impedance Fault (HIF) detection algorithm is evaluated in a simulated distribution system. For this purpose, an analysis was conducted on a real overhead feeder belonging to Neoenergia Brasília. Initially, a detailed description of the characteristics of the studied distribution network is provided. This includes essential information such as the primary voltage at which the network operates, its total length in kilometers, and the types of cable arrangements present in the feeder. Subsequently, specific data about the circuit were collected, such as the location of transformers, the nominal power of each transformer, and the length of each network segment. Once collected, the distribution circuit is modeled using the ATP (*Alternative Transients Program*) software, widely used to simulate the transient behavior of electrical systems. The modeling involves a detailed representation of network components, as well as a computational model of high-impedance fault aiming to represent the nature of the event with high detail. Certainly, describing the circuit using ATP software is crucial for conducting simulations with the goal of evaluating the analyzed detection algorithm.

Keywords: Distribution system protection, electromagnetic transients analysis, feeder modeling, fault diagnosis, high-impedance faults, detection algorithm.

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA | 1 |
| 1.2 | OBJETIVOS DO TRABALHO..... | 2 |
| 1.3 | ORGANIZAÇÃO DO TEXTO | 3 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 4 |
| 2.1 | CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DE UMA FAI | 4 |
| 2.1.1 | ROMPIMENTO E QUEDA DE CONDUTOR PRIMÁRIO | 4 |
| 2.1.2 | O ARCO ELÉTRICO..... | 5 |
| 2.2 | PRINCIPAIS MODELOS DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA | 7 |
| 2.2.1 | MODELO DE DIODOS EM ANTIPARALELO | 8 |
| 2.2.2 | RESISTÊNCIAS VARIÁVEIS | 8 |
| 2.2.3 | DIODOS ANTIPARALELOS COM INTERMITÊNCIA | 9 |
| 2.2.4 | RESISTÊNCIAS VARIÁVEIS COM CONTROLADORES | 10 |
| 2.3 | MÉTODOS DE DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA | 11 |
| 2.3.1 | GRANDEZA MONITORADA: CORRENTE..... | 11 |
| 2.3.2 | GRANDEZA MONITORADA: TEMPO (SILVA, 1992) | 11 |
| 2.3.3 | GRANDEZA MONITORADA: TENSÃO (MALAGODI, 1997)..... | 12 |
| 3 | DESCRIÇÃO DO MÉTODO AVALIADO | 14 |
| 3.1 | CONSIDERAÇÕES GERAIS | 14 |
| 3.2 | DESIGN DA DETECÇÃO DE FAI..... | 15 |
| 3.2.1 | SOMA DE CORRENTE DIFERENCIAL | 15 |
| 3.2.2 | FILTRO DIGITAL | 17 |
| 3.2.3 | TENDÊNCIA E MEMÓRIA | 18 |
| 3.2.4 | AJUSTE ADAPTATIVO | 19 |
| 3.2.5 | LÓGICA DE DECISÃO | 20 |
| 4 | MODELAGEM DO ALIMENTADOR E DA FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA | 22 |
| 4.1 | ATPDRAW..... | 22 |
| 4.2 | REDE DE DISTRIBUIÇÃO ESTUDADA | 23 |
| 4.2.1 | REPRESENTAÇÃO DAS LINHAS | 24 |
| 4.2.2 | REPRESENTAÇÃO DOS TRANSFORMADORES | 26 |
| 4.3 | MODELAGEM DA FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA..... | 29 |
| 5 | APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS | 31 |
| 5.1 | PARÂMETROS UTILIZADOS NA MODELAGEM | 31 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5.1.1 | PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO..... | 31 |
| 5.1.2 | PARÂMETROS DA FONTE AC..... | 32 |
| 5.1.3 | PARÂMETROS DO LCC TEMPLATE..... | 34 |
| 5.1.4 | PARÂMETROS DAS CARGAS RLCD3..... | 35 |
| 5.2 | IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DE FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA..... | 36 |
| 5.2.1 | CONFIGURAÇÕES..... | 36 |
| 5.2.1.1 | INSTANTE DO ROMPIMENTO DO CONDUTOR..... | 36 |
| 5.2.1.2 | TEMPO DE QUEDA, INÍCIO DA FAI E INTERMITÊNCIAS..... | 36 |
| 5.2.1.3 | CORRENTE DE FAI..... | 37 |
| 5.3 | SIMULAÇÃO DA FAI..... | 39 |
| 5.3.1 | SUPERFÍCIE 1: GRAMA MOLHADA..... | 40 |
| 5.3.2 | SUPERFÍCIE 2: ASFALTO MOLHADO..... | 44 |
| 5.4 | IMPLEMENTAÇÃO E DESEMPENHO DO ALGORITMO DE DETECÇÃO EM MATLAB..... | 49 |
| 5.4.1 | IMPLEMENTAÇÃO EM MATLAB..... | 49 |
| 5.4.2 | RESULTADOS E DESEMPENHO DO ALGORITMO..... | 51 |
| 5.4.2.1 | ALIMENTADOR OPERANDO EM CONDIÇÕES NORMAIS..... | 51 |
| 5.4.2.2 | FALTA APLICADA. SUPERFÍCIE 1: GRAMA MOLHADA..... | 52 |
| 5.4.2.3 | FALTA APLICADA. SUPERFÍCIE 2: ASFALTO MOLHADO..... | 54 |
| 6 | CONCLUSÃO E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS..... | 56 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 58 |
| A | APÊNDICE A..... | 61 |
| B | APÊNDICE B..... | 62 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----|--|----|
| 1.1 | Ilustração de rompimento de um condutor fase num vão. Modificado de Oliveira Junior (2006) | 2 |
| 2.1 | Sequência de eventos considerada para as faltas de alta impedância em redes de distribuição. Modificado de Nakagomi (2006) | 5 |
| 2.2 | Exemplo de avalanche. Modificado de Trondoli (2023) | 6 |
| 2.3 | Exemplo de modulação. Modificado de Trondoli (2023) | 6 |
| 2.4 | Corrente de uma FAI com presença de suas principais características. Modificado de Santos (2016) | 7 |
| 2.5 | Modelo de diodos em antiparalelo. Modificado de Emanuel et al. (1990a) | 8 |
| 2.6 | Modelo de resistências variáveis..... | 9 |
| 2.7 | Modelo de diodos em antiparalelo com intermitência. | 9 |
| 2.8 | Modelo de resistências variáveis com controladores. Modificado de Santos (2016) | 10 |
| 3.1 | Diagrama de blocos do algoritmo de detecção de FAI. Modificado de Hou (2007) .. | 15 |
| 3.2 | Cálculo da Soma de Corrente Diferencial (SDI) (Hou, 2007)..... | 16 |
| 3.3 | Ilustração do cálculo da SDI (Hou, 2007)..... | 16 |
| 3.4 | Resposta em frequência de magnitude de um ciclo de diferença de corrente para o quarto harmônico (Hou, 2007). | 17 |
| 3.5 | Filtro IIR (Hou, 2007)..... | 17 |
| 3.6 | Função de Tendência e Memória (Hou, 2007). | 18 |
| 3.7 | Função de Ajuste Adaptativo (Hou, 2007). | 19 |
| 3.8 | Função de Lógica de Decisão (Hou, 2007). | 20 |
| 3.9 | Regiões de Contagem..... | 21 |
| 4.1 | Alimentador 1004 da Neoenergia..... | 23 |
| 4.2 | Rede convencional (CEB, NTD 2.12, 2011). | 24 |
| 4.3 | Rede compacta (CEB, NTD 2.06, 2011). | 24 |
| 4.4 | LCC template..... | 25 |
| 4.5 | Alimentador 1004 modelado no ATPDraw..... | 28 |
| 4.6 | Modelo de FAI proposto. | 30 |
| 5.1 | Valores pico de tensão de fase: Aba Plot ATPDraw..... | 33 |
| 5.2 | Disposição dos Condutores: <i>View</i> ATPDraw..... | 35 |
| 5.3 | Pontos correspondentes à aproximação para a resistência $R(t)$ | 39 |
| 5.4 | Ponto de inserção de defeito. | 40 |
| 5.5 | Corrente do alimentador antes e depois da falta..... | 41 |
| 5.6 | Corrente de Falta. Superfície: Grama. | 42 |
| 5.7 | Instante de rompimento do condutor..... | 42 |

| | | |
|------|--|----|
| 5.8 | Instante de conexão do ramo de falta. | 43 |
| 5.9 | Instante de intermitência. | 43 |
| 5.10 | Instante de reconexão do ramo de falta. | 44 |
| 5.11 | Corrente do alimentador antes e depois da falta. | 45 |
| 5.12 | Corrente de Falta. Superfície: Asfalto. | 46 |
| 5.13 | Instante de rompimento do condutor. | 46 |
| 5.14 | Instante de conexão do ramo de falta. | 47 |
| 5.15 | Instante de intermitência. | 48 |
| 5.16 | Instante de reconexão do ramo de falta. | 49 |
| 5.17 | Quantidade SDI e referência. Caso sem falta. | 51 |
| 5.18 | Quantidade SDI e referência. Superfície 1. | 52 |
| 5.19 | Regiões de Contagem: Lógica de Decisão. Superfície 1. | 53 |
| 5.20 | Quantidade SDI e referência. Superfície 2. | 54 |
| 5.21 | Regiões de Contagem: Lógica de Decisão. Superfície 2. | 54 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|------|--|----|
| 4.1 | Descrição dos cabos..... | 25 |
| 4.2 | Descrição dos transformadores..... | 27 |
| 4.3 | Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 2,3 kV e inferior a 69 kV (ANEEL, 2021)..... | 27 |
| 4.4 | Níveis de tensão em pontos extremos do alimentador. | 27 |
| 4.5 | Níveis de corrente do alimentador na saída da subestação. | 29 |
| 5.1 | Parâmetros da Simulação. | 32 |
| 5.2 | Dados para a fonte de tensão AC. | 33 |
| 5.3 | Dados de Impedância de Curto para a SE 10. | 33 |
| 5.4 | Dados para Template de Rede Convencional e Compacta com Circuito Simples. ... | 34 |
| 5.5 | Dados para Template de Rede Compacta com Circuito Duplo. | 34 |
| 5.6 | Variáveis para o elemento <i>RLCD3</i> para a fase A. Valores em Ohms..... | 35 |
| 5.7 | Dados de tempo, em segundos, para a configuração da chave trifásica..... | 36 |
| 5.8 | Dados de tempo, em segundos, para a configuração da chave monofásica. | 37 |
| 5.9 | Característica <i>Reclosing switch</i> | 37 |
| 5.10 | Níveis das correntes de falta (Santos, 2011)..... | 38 |
| 5.11 | Parâmetros Fonte V_1 | 39 |
| 5.12 | Parâmetros Fonte V_2 | 39 |
| 5.13 | Tabela de Região e Frequência. Superfície 1. | 53 |
| 5.14 | Tabela de Região e Frequência. Superfície 2. | 55 |

LISTA DE SÍMBOLOS

Glossário

| | |
|---------|--|
| FAI | Falta de Alta Impedância |
| ATP | <i>Alternative Transients Program</i> |
| SDEE | Sistema de Distribuição de Energia Elétrica |
| TACS | <i>Transient Analysis Control System</i> |
| RVT | Resistência Variante no Tempo |
| CSCT | Chave Simples Controlada por TACS |
| RDP | Registradores Digitais de Perturbações |
| RMS | <i>Root Mean Square</i> |
| SDI | <i>Sum of Difference Current</i> |
| DC | <i>Direct Current</i> |
| IIR | <i>Infinite Impulse Response</i> |
| CA | Cabo de Alumínio |
| AWG | <i>American Wire Gauge</i> |
| AC | <i>Alternating Current</i> |
| SCADA | <i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> |
| SE | Subestação |
| TC | Transformador de Corrente |
| TP | Transformador de Potência |
| UnB | Universidade de Brasília |
| PRODIST | Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional |
| CEB | Companhia Energética de Brasília |
| COD | Centro de Operação da Distribuição |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

Um sistema elétrico de potência é dividido principalmente em três componentes principais: geração, transmissão e distribuição. As linhas de transmissão são responsáveis pela conexão entre as usinas geradoras e os sistemas de distribuição, exercendo um papel crucial. Em se tratando do sistema de distribuição, é essencial ao interligar todas as cargas individuais às linhas de transmissão por meio de subestações, onde ocorrem as transformações de tensão.

É possível definir, de forma conceitual, um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) como o conjunto completo de instalações e equipamentos elétricos pertencentes a uma concessionária em sua área de distribuição. Isso engloba não somente as instalações de distribuição, como também outras instalações de transmissão disponibilizadas a distribuidoras e externas à rede básica.

Durante a operação de um SDEE, é comum a ocorrência de falhas nos diversos componentes, acarretando interrupções no fornecimento de energia elétrica para os consumidores conectados a esse sistema. Por conta disso, há uma redução da qualidade do serviço prestado pela distribuidora.

Uma falta num circuito é qualquer falha que interfere com o fluxo normal de corrente e pode ser muito prejudicial a um sistema de potência (**Stevenson, 2016**). Dentre as várias perturbações as quais podem afetar um SDEE, pode-se citar com destaque especial as Faltas de Alta Impedância. De maneira concisa, uma FAI ocorre quando um condutor primário energizado entra em contato com uma superfície de baixa condutividade, consoante se observa na Figura 1.1.

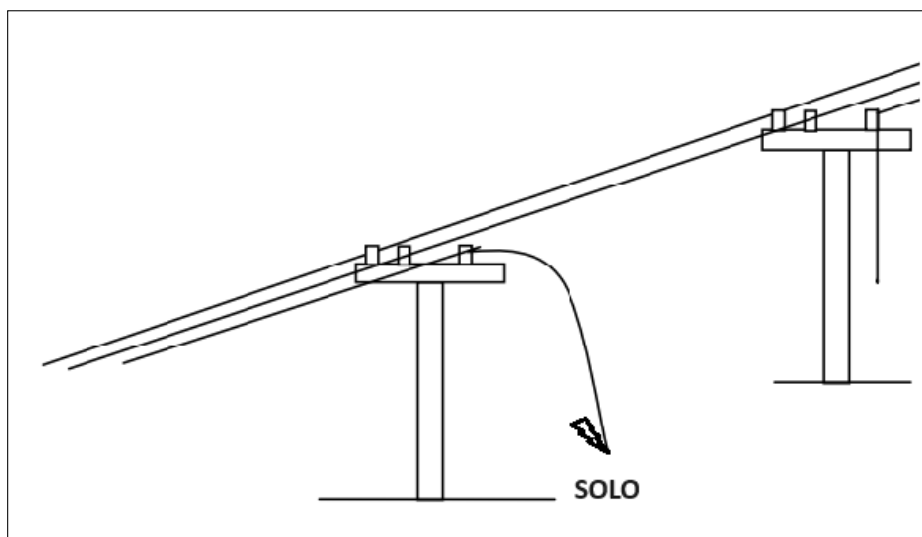


Figura 1.1: Ilustração de rompimento de um condutor fase num vão. Modificado de **Oliveira Junior (2006)**.

Uma FAI também pode ser ocasionada pelo contato do condutor com árvores, problemas com isoladores ou até mesmo pela ruptura do condutor elétrico, levando-o a cair no solo. Como resultado, surgem correntes de falta de magnitude semelhante às correntes de carga e a outros distúrbios típicos em sistemas de distribuição. Por conta disso, os sistemas de proteção convencionais, baseados na detecção de sobrecorrente, enfrentam dificuldades para identificar e isolar esse tipo específico de falha.

Essa situação claramente ressalta a relevância do estudo, projeto e aprimoramento da proteção em sistemas de distribuição de energia, o qual pode ser feito por meio do uso de simulações computacionais, haja vista que a execução de testes de FAI em um alimentador em operação pode provocar desligamentos não-programados, o que impacta tanto na qualidade, quanto na continuidade do fornecimento de energia elétrica ao consumidor.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo do trabalho é avaliar técnicas de detecção de faltas de alta impedância em redes de distribuição de energia elétrica, por meio do uso de ferramentas computacionais que permitam a modelagem e a simulação de uma rede de distribuição. Para tal, são definidos como objetivos específicos:

- Modelar no ATP (*Alternative Transients Program*) uma rede de distribuição real da Neenergia Brasília;
- Analisar o correto funcionamento das linhas e dos transformadores modelados;
- Verificar a resolução normativa brasileira de forma a avaliar se os níveis de tensão nos pontos extremos de conexão do alimentador estão dentro da faixa de variação de tensão de

leitura em relação à tensão de referência;

- Simular o modelo de FAI (Falta de Alta Impedância) desenvolvido;
- Averiguar a eficiência do algoritmo de detecção proposto no artigo de **Hou (2007)**.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O trabalho de conclusão será organizado da seguinte maneira:

- No capítulo 2, são revisadas as características das FAIs, os modelos de FAI e os métodos de detecção propostos pela literatura;
- No capítulo 3, é descrito o algoritmo de detecção de faltas de alta impedância desenvolvido por **Hou (2007)**;
- No capítulo 4, são descritos os passos para a modelagem do alimentador de distribuição 1004 da Neoenergia Brasília e do modelo de FAI implementado;
- No capítulo 5, apresentam-se os resultados das simulações realizadas e análises importantes;
- Por fim, no capítulo 6, são expostas as conclusões e propostas para trabalhos futuros que possam dar continuidade a este estudo.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo descreve as características das FAIs, estabelecendo assim o fundamento para a análise do algoritmo de detecção, o qual será apresentado no Capítulo 3. Adicionalmente, explora-se a literatura para a discussão dos modelos existentes de FAIs, os quais têm o objetivo de reproduzir o comportamento deste tipo específico de falta, além dos principais métodos de detecção existentes.

2.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DE UMA FAI

Em SDEE, faltas de alta impedância são caracterizadas por não gerarem corrente de falta suficiente para serem detectadas por relés de sobrecorrente convencionais ou fusíveis, o que dificulta os ajustes do sistema de proteção (**PSRC Working Group D15, 1996**). A baixa amplitude da corrente de falta é da mesma ordem de grandeza da corrente ocasionada por outros fenômenos, tais como o chaveamento de bancos de capacitores e energização de carga. Com o intuito de diferenciar FAIs de outras ocorrências no sistema, são descritas a seguir outras características singulares do processo de formação de uma FAI.

2.1.1 Rompimento e Queda de Condutor Primário

Os condutores da rede primária aérea podem ocasionalmente romper-se devido a diversos fatores, tais como dilatação causada pela passagem de corrente elétrica, conexões executadas de maneira inadequada e influências de fatores ambientais. O anúncio do início de uma falta de alta impedância é a ocorrência do rompimento e consequente queda do condutor primário.

Conforme **Nakagomi (2006)**, uma FAI pode ser constituída de quatro etapas conforme se observa na Figura 2.1.

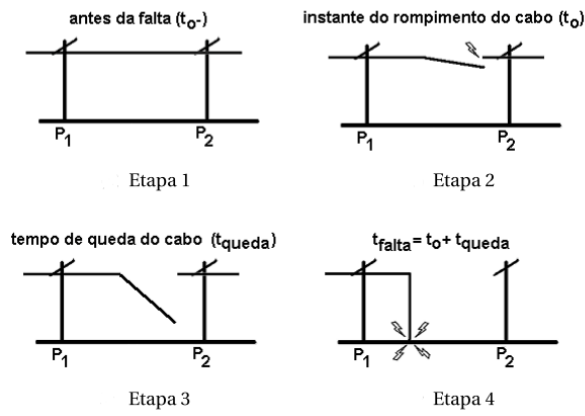


Figura 2.1: Sequência de eventos considerada para as faltas de alta impedância em redes de distribuição. Modificado de Nakagomi (2006).

A condição de pré-falta equivale a condição em que as correntes que circulam pela rede elétrica são produzidas apenas devido às cargas. No instante (t_0), ocorre o rompimento de um dos condutores da rede primária, que, por sua vez, leva um tempo (t_{queda}) para atingir o solo. Admita-se que não há contato durante a queda do cabo rompido com outros condutores (fase ou neutro). O tempo de queda pode ser calculado por meio da Equação 2.1, de queda livre.

$$t_{queda} = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (2.1)$$

Em que:

h = altura da rede primária

g = aceleração da gravidade

Quando um condutor elétrico se rompe, ele não mantém, de início, um contato firme ao atingir o solo, uma superfície de alto valor resistivo. Geralmente, isso provoca o aparecimento de arcos elétricos.

2.1.2 O Arco Elétrico

O arco elétrico é uma descarga elétrica entre dois eletrodos, através de gás ou vapor, e ocorre como resultado do mau contato entre o condutor e uma superfície de baixa condutância (Sedighi-zadeh et al., 2010). O toque do cabo ao solo possibilita a passagem de corrente elétrica, com amplitude a depender da resistência de cada tipo de solo, somada à resistência do arco elétrico gerado em consequência da falta e à tensão da fase rompida.

A corrente de falta apresenta características peculiares, as quais serão detalhadas a seguir.

1. **Avalanche:** Segundo Emanuel et al. (1990b), consiste no surgimento de harmônicos ímpares no sistema. A rápida ionização do meio reduz a impedância de contato entre o condutor

e o solo, dando início à passagem de corrente elétrica e, conseqüentemente, a formação do arco elétrico.

O contato do condutor elétrico com o solo se intensifica à medida que elétrons livres no ar são acelerados pelo campo elétrico formado entre o condutor e a superfície. Ao se atingir um limiar de energia cinética, as moléculas neutras do ar são ionizadas, liberando novos elétrons livres. As colisões repetitivas e sucessivas dos elétrons com moléculas neutras em um curto período de tempo, tornando o ar um condutor elétrico, constitui o fenômeno de avalanche. A Figura 2.2 ilustra a assinatura desse evento no sinal de corrente da FAI;

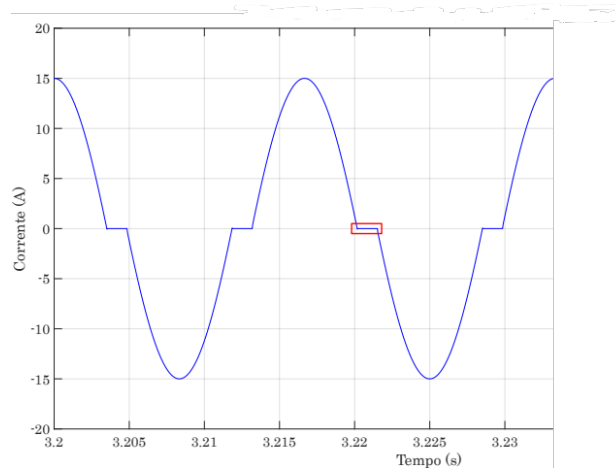


Figura 2.2: Exemplo de avalanche. Modificado de **Trondoli (2023)**.

2. Modulação: O arco elétrico tem o comprimento variado ao longo do tempo, a depender do tipo de solo, da umidade, das reações químicas e do calor gerado. Como consequência, a amplitude da corrente de falta varia, apresentando modulações (**Aucoin and Russell, 1987**). A modulação é considerada aleatória, haja vista que as condições do meio são extremamente improváveis. A Figura 2.3 ilustra o evento;

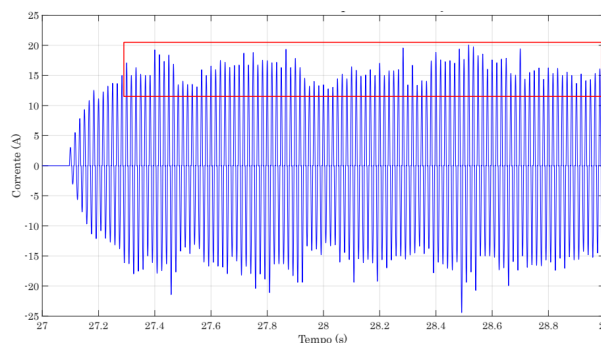


Figura 2.3: Exemplo de modulação. Modificado de **Trondoli (2023)**.

3. Assimetria: O semiciclo positivo pode ser maior que o negativo ou vice-versa, o que torna assimétrica a forma de onda da corrente. Essa característica ocorre em caso de solos arenosos, por conta da presença da sílica, a qual age como um cátodo que emite elétrons no

momento em que a tensão do arco elétrico é positiva. Outro fator causador de assimetria em qualquer tipo de solo é a umidade, visto que pode alterar a tensão do arco a cada semiciclo;

4. Não linearidade: A curva que caracteriza a tensão em função da corrente é não-linear;
5. *Buildup*: Consoante **Nam et al. (2001b)**, o crescimento gradual da amplitude da corrente até seu máximo é denominado *buildup*. Esse fenômeno ocorre na maioria das faltas de alta impedância;
6. *Shoulder*: Em conformidade com **Jeerings and Linders (1989)**, o evento de *shoulder* corresponde aos períodos em que a amplitude da corrente permanece constante, isto é, são intervalos de *buildup* por alguns ciclos;
7. Intermitência: Os períodos de existência e extinção dos arcos elétricos são aleatórios. Conseqüentemente, a corrente de falta torna-se intermitente. Consiste nos ciclos em que o cabo energizado interrompe o contato com o solo.

É possível observar na Figura 2.4, correspondente a uma oscilografia real de uma FAI, as características de intermitência, *shoulder*, *buildup*, não linearidade e assimetria.

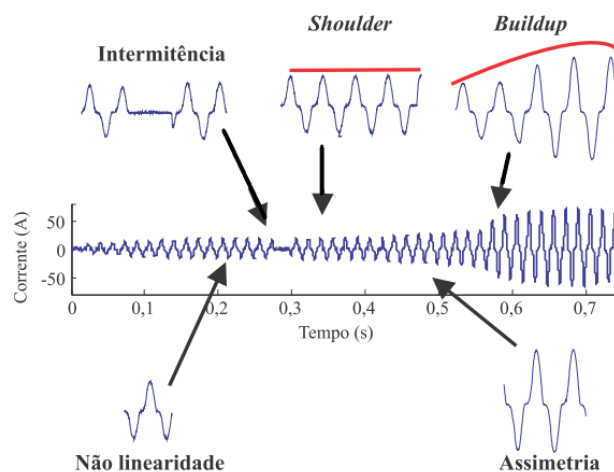


Figura 2.4: Corrente de uma FAI com presença de suas principais características. Modificado de **Santos (2016)**.

2.2 PRINCIPAIS MODELOS DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

Com o intuito de que o resultado de um algoritmo de detecção de FAIs seja confiável, ele deve ser testado com sinais obtidos de medidas reais ou de um modelo elétrico o qual represente o evento com fidelidade, isto é, que seja capaz de reproduzir as características apresentadas na Seção 2.1.2. A seguir, são descritos os principais modelos de FAI propostos na literatura.

2.2.1 Modelo de Diodos em Antiparalelo

Conhecido como Modelo de Emanuel, foi um dos primeiros modelos de falta de alta impedância desenvolvido, baseado nas características do arco elétrico, proposto por **Emanuel et al. (1990a)**. Esse é resultado do estudo de medidas de FAIs realizadas em ensaios de campo e de um experimento laboratorial com FAIs em um solo arenoso. Representado na Figura 2.5, é composto por um resistor em série com um indutor e dois diodos conectados em antiparalelo. Há uma fonte de tensão contínua em série com cada um dos diodos. Nessa configuração, a corrente de falta circula através da fonte de tensão V_1 durante seu semiciclo positivo e através de V_2 durante o semiciclo negativo. Com $V_2 > V_1$, a corrente de falta no semiciclo positivo é maior que a corrente de falta no semiciclo negativo, o que simula a não linearidade e a assimetria da corrente de FAI.

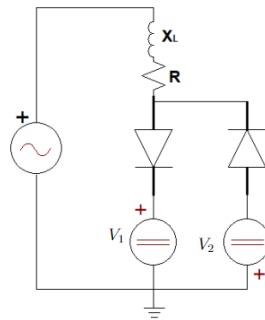


Figura 2.5: Modelo de diodos em antiparalelo. Modificado de **Emanuel et al. (1990a)**.

Apesar de o modelo possibilitar a representação das características de assimetria e não-linearidade das FAIs e possuir simples implementação, por não ser necessário um conhecimento prévio dos pontos de operação da tensão e corrente de falta, sua principal limitação está relacionada a não representação das características de *buildup*, *shoulder* e intermitência.

2.2.2 Resistências Variáveis

O modelo, ilustrado na Figura 2.6, foi proposto por **Nam et al. (2001a)** e utiliza duas resistências variáveis conectadas em série. A resistência $R_1(t)$ é responsável por reproduzir as características de não linearidade e assimetria da corrente de FAI, enquanto que a resistência $R_2(t)$ simula as características de *buildup* e o *shoulder*. A desvantagem do modelo está na utilização de valores de medição de faltas reais para o cálculo do valor das resistências, através da relação de tensão e corrente. Dessa maneira, o modelo possui a mesma forma de onda em todas as simulações realizadas. Com o intuito de alterar o comportamento da falta, é impreterível recalculas as resistências ao longo do tempo, com base nos novos valores de corrente e tensão de falta, fruto de novas medições.

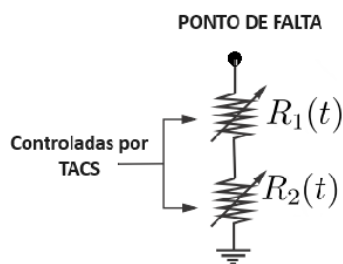


Figura 2.6: Modelo de resistências variáveis.

Para o desenvolvimento do modelo, **Nam et al. (2001a)** realizou os testes em um alimentador de distribuição real com tensão primária de 22,9 kV.

2.2.3 Diodos Antiparalelos com Intermitência

Este modelo, proposto por **Chan and Yibin (1998)**, consiste em uma adaptação do modelo apresentado na Subseção 2.2.1, conforme ilustrado na Figura 2.7.

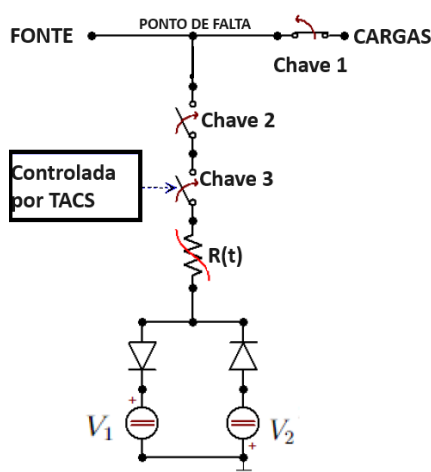


Figura 2.7: Modelo de diodos em antiparalelo com intermitência.

Ao modelo de base, foi acrescentado uma chave convencional (Chave 1) controlada por tempo a qual possibilita a interrupção do fornecimento de energia às cargas à jusante do ponto de falta, uma chave que conecta a falta ao alimentador (Chave 2) e uma chave (Chave 3) controlada pela rotina TACS do software ATP, a fim de simular intermitências da corrente de FAI.

O modelo permite a verificação das características de não linearidade, assimetria e intermitência, entretanto não contempla as características de *buildup* e *shoulder* da corrente de FAI.

2.2.4 Resistências Variáveis com Controladores

O presente modelo, da Figura 2.8, foi proposto por Santos (2016). Ele utiliza duas resistências variantes no tempo (RVT) em série, controladas pela rotina TACS do software ATP, uma chave simples controlada por TACS (CSCT), com o objetivo de dar início à falta e simular a descontinuidade da corrente de falta e uma chave comum à jusante do ponto de falta para simulação do rompimento do condutor.

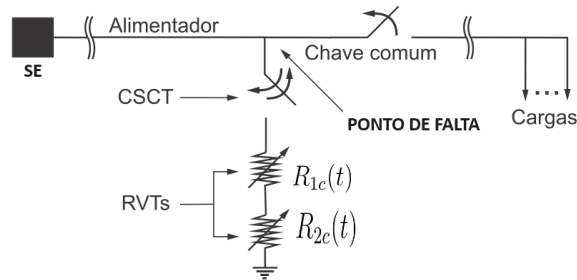


Figura 2.8: Modelo de resistências variáveis com controladores. Modificado de Santos (2016).

As características de não linearidade e assimetria são obtidas através da resistência $R_{1c}(t)$, cujo valor foi calculado com base na razão entre tensão e corrente do regime permanente de falta, utilizando uma rotina na linguagem MODELS que distingue a curva correta a ser usada por meio do cálculo da derivada da tensão no ponto de falta.

A resistência $R_{2c}(t)$ é responsável pela simulação do *buildup* e *shoulder* da corrente de FAI, cujo valor foi calculado por uma regressão polinomial conforme realizado por Nam et al. (2001a). Para esse modelo em específico, $R_{2c}(t)$ foi aproximada por uma função exponencial, para que se tornasse possível inserir curtos instantes de constância no *buildup*. O tempo de decaimento da resistência foi dividido em tempo de espera e tempo de constância, sendo que o primeiro se refere ao decaimento exponencial (*buildup*) e o segundo ao período em que $R_{2c}(t)$ permanece constante (*shoulder*).

O ajuste dos parâmetros do modelo utilizado foi baseado em oscilografias reais de ensaios realizados em um alimentador real da distribuidora Energisa Paraíba. Os ensaios distinguiam-se pelos diferentes tipos de solo utilizados para o contato com o condutor energizado: grama, brita, calçamento, asfalto, areia, etc. Para fins de medição de tensão e corrente, foram instalados Registradores Digitais de Perturbação em três pontos distintos do alimentador, a uma taxa de amostragem de 15360 Hz.

Apesar de o modelo em questão permitir a verificação das características de não linearidade, assimetria, intermitência, *buildup* e *shoulder*, mostrando-se bem completo, sua implementação é complicada e de difícil reprodução, haja vista que é essencial a busca dos pontos de operação do modelo em vetores de medição de tensão e corrente.

2.3 MÉTODOS DE DETECÇÃO DE FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA

Foram desenvolvidos, ao longo das últimas décadas, diversos métodos de detecção de FAI, os quais se diferem conforme a grandeza monitorada: corrente, tempo de propagação de pulsos aplicados ao alimentador ou tensão. A seguir, será feita uma revisão bibliográfica de métodos de detecção de FAIs presentes na literatura conforme os três tipos de monitoramento. São apresentados ainda os problemas operacionais relacionados a cada um e sua abrangência na detecção desse tipo de falta.

2.3.1 Grandeza Monitorada: Corrente

Em meados da década de 70, concessionárias, fabricantes e universidades apoiaram veementemente projetos de pesquisa de características de faltas de alta impedância com o intuito de construir novos equipamentos. Os primeiros métodos de detecção de FAIs eram mecânicos e visavam forçar o contato do condutor rompido com um objeto solidamente aterrado, com o mote de fazer atuar a proteção convencional por sobrecorrente. Tornou-se inviável essa solução devido ao alto custo de instalação.

O modelo proposto por **Calhoun et al. (1982)** consiste em um relé acionado pela amplitude de sequência zero da corrente. Neste, a relação entre o limiar de *trip* e o aumento da corrente de carga era preestabelecida, tornando o método ineficiente para os SDEE atuais.

Anos depois, os autores **Huang et al. (1988)** propoem um modelo com dois relés acionados pela amplitude dos componentes de segundo e terceiro harmônicos. Tornou-se inviável a utilização do algoritmo desenvolvido ao levar em conta que não é possível pré-definir um valor limiar para as cargas atuais e as correntes de FAI.

No mesmo ano, os autores **Kim and Russell (1988)** examinaram os componentes harmônicos em períodos antes e depois de falhas reais de sinal. Em suas conclusões, observaram que os harmônicos ímpares predominam em condições de solo seco e molhado. Notavelmente, o terceiro e quinto harmônicos apresentaram as maiores amplitudes absolutas. Entre as frequências pares, os harmônicos de segunda e quarta ordem foram os mais proeminentes, independentemente das condições do solo. Além disso, o estudo abordou o aumento relativo de amplitude das frequências, indicando que esse parâmetro foi mais pronunciado nos componentes pares, especialmente nos oitavo e décimo harmônicos. Os pesquisadores concluíram que o aumento relativo dessas frequências pode servir como um indicador eficaz de falhas à terra.

2.3.2 Grandeza Monitorada: Tempo (Silva, 1992)

O autor propõe um método baseado na reflexão e refração dos impulsos elétricos de tensão ou corrente no ponto de falta. Analisa-se o tempo de trânsito dos sinais injetados no sistema ao longo do alimentador, de modo a verificar discontinuidades nos condutores. A modelagem do sistema

é feita segundo as leis de propagação das ondas viajantes. Dessa maneira, os componentes do sistema são representados pelas suas impedâncias características e seus parâmetros distribuídos, o que resulta em tempos de trânsito das ondas viajantes em cada componente.

Ao se detectar o rompimento no alimentador, há a possibilidade de ocorrência de dois eventos distintos: abertura ou fechamento de chaves ou uma falta, podendo ser de baixa ou alta impedância. Com o mote de identificar uma falta, **Silva (1992)** propõe a criação de uma base de dados, de forma *off-line*, que contenha as respostas esperadas aos impulsos injetados no SDEE. A partir do comparativo das medições com os padrões disponíveis nessa base, ocorre a distinção das FAIs em relação a outros fenômenos.

Esse método permite a localização do ponto de ocorrência do defeito, a partir do fato de que a onda injetada viaja aproximadamente na velocidade da luz, logo as distâncias percorridas pelas ondas ao longo do alimentador partido podem ser estimadas. Apesar de ser possível o cálculo da distância entre o ponto de defeito e a subestação, não é indicado o local exato da FAI, por conta das ramificações presentes nas linhas de distribuição.

Esse método requer altas taxas de amostragem, haja vista que se baseia na análise das componentes de alta frequência do sinal. Consequentemente, sua implementação é restrita apenas aos Registradores Digitais de Perturbações (RDP).

2.3.3 Grandeza Monitorada: Tensão (Malagodi, 1997)

O autor baseou-se no fato de que as tensões do alimentador à jusante do ponto de falta apresentam desequilíbrio considerável, após o rompimento de um condutor. Este pode ser detectado através do monitoramento de seus componentes de sequência zero ou negativa. Por meio de simulações computacionais, **Malagodi (1997)** nota que é possível detectar FAIs com a medida de desequilíbrio de tensão.

O desequilíbrio de tensão é quantificado por meio de duas grandezas, G_2 , a relação entre o módulo da componente de sequência negativa de tensão e o módulo da componente de sequência positiva, e G_0 , a relação entre o módulo da componente de sequência zero de tensão e o módulo da componente de sequência positiva. Essas grandezas estão expressas nas Equações 2.2 e 2.3, respectivamente.

$$G_2 = \frac{|V_2|}{|V_1|} \quad (2.2)$$

$$G_0 = \frac{|V_0|}{|V_1|} \quad (2.3)$$

Em que:

V_2 = componente de sequência negativa de tensão

V_1 = componente de sequência positiva de tensão

V_0 = componente de sequência zero de tensão

Com o intuito de se localizar o defeito, é necessário um esquema de proteção com a instalação de sensores em pontos estratégicos do alimentador, associado a um sistema de comunicação que envie sinais de cada sensor para o Centro de Operação da Distribuição (COD). Quanto maior o número de sensores instalados, maior o nível de proteção do alimentador, ao considerar também sua tipologia. Uma negativa desse tipo de proteção consiste na dificuldade do processo de distinção entre uma falta de alta impedância e uma abertura monopolar de um equipamento de proteção à montante do local de rompimento do cabo, no caso de uma falta de baixa impedância, o que compromete sua confiabilidade. É importante ressaltar que esse método é ineficaz na detecção de FAIs em que não ocorre rompimento de condutores, mas sim o contato com superfícies de alta impedância, a exemplo das árvores, visto que o desequilíbrio das tensões é arrefecido.

DESCRIÇÃO DO MÉTODO AVALIADO

Certamente, um diagnóstico de um distúrbio na rede elétrica configura uma etapa importante na melhoria da qualidade do serviço, haja vista que permite a rápida eliminação do distúrbio, ao promover a desenergização da parte defeituosa do sistema.

A elaboração de métodos para diagnóstico de FAI possui preferência por simulações computacionais em relação a ensaios em campo em um alimentador em operação, de modo a não ocasionar desligamentos não-programados e, conseqüentemente, prejuízos financeiros à concessionária e aos consumidores.

Dentre os métodos desenvolvidos, o presente trabalho avaliou a forma de detecção proposta no artigo de **Hou (2007)**. Um resumo do algoritmo proposto é apresentado a seguir.

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Quando linhas aéreas perdem suportes e caem em superfícies com baixa condutividade, ocorrem faltas de alta impedância. Suas correntes de falha são bastantes pequenas e não são detectadas por relés convencionais de sobrecorrente, por possuírem correntes de magnitude que pode variar de zero a menos de 100 amperes.

As proteções de sobrecorrente que dependem do componente fundamental ou do valor eficaz (RMS) das correntes são ineficazes na detecção de FAI. Isso ocorre porque condutores de energia caídos sobre o asfalto ou a areia geram praticamente nenhuma corrente, e, portanto, nenhum dispositivo baseado em subestação pode detectá-la. Assim, a operação do sistema de distribuição de energia não é afetada nesses casos.

Embora a magnitude da corrente seja pequena, as faltas ocasionadas por condutores caídos são uma preocupação de segurança pública e perigo para vidas e propriedades. Diante disso, o artigo de **Hou (2007)** apresenta um algoritmo de detecção de FAI de simples implementação que pode contornar as dificuldades no diagnóstico de faltas a nível de subestação e promover um método eficiente que evita alarmes falsos, sendo uma solução mais eficaz.

3.2 DESIGN DA DETECÇÃO DE FAI

Com base em pesquisas e estudos, o autor observou que há elementos-chave para o design bem-sucedido de um algoritmo de detecção de FAI:

- Uma quantidade informativa que revele as assinaturas de FAI o máximo possível, sem ser afetada por cargas e outras condições de operação do sistema;
- Uma média móvel que forneça uma referência pré-falta estável a qual sempre deve estar disponível, mesmo durante a ocorrência de uma falta. Com esse objetivo, a média não deve acompanhar a grande quantidade de falha durante o evento;
- Uma característica de ajuste adaptativo que aprenda e ajuste as condições de ruído ambiente do alimentador. Esse ajuste deve ocorrer sempre que o algoritmo não detecta uma condição de FAI no sistema;
- Uma lógica de decisão eficaz capaz de diferenciar uma condição de FAI de outras condições do sistema, como operações de comutação e cargas ruidosas.

O algoritmo proposto no artigo é centrado nos elementos supracitados e inclui outros blocos complementadores. A Figura 3.1 mostra o diagrama de blocos do algoritmo para a corrente na fase A. O processo pode ser refeito para as fases B e C e para as correntes residuais.

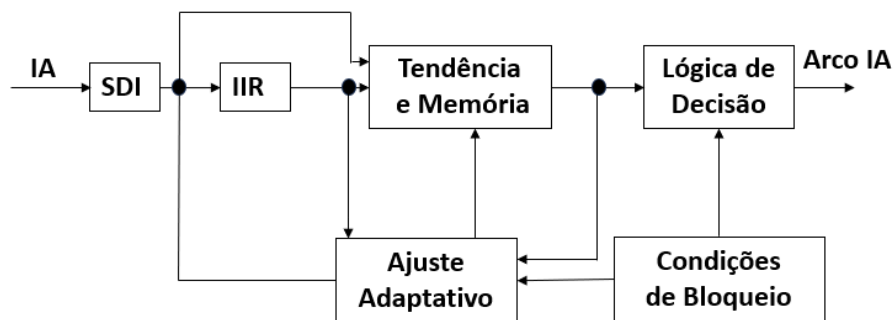


Figura 3.1: Diagrama de blocos do algoritmo de detecção de FAI. Modificado de Hou (2007).

Como etapas principais, é possível citar a seleção de quantidade de entrada, a geração de uma referência confiável, adaptação a ruídos e lógica de decisão. A seguir, são descritas as funções de cada bloco do diagrama.

3.2.1 Soma de Corrente Diferencial

O primeiro bloco de função calcula uma quantidade de sinal na qual o algoritmo baseia sua detecção de FAI. Essa quantidade é chamada de Soma de Corrente Diferencial, ou SDI, e constitui a entrada para a detecção de falhas. No design, ilustrado na Figura 3.2, o sistema amostra as

correntes I_k do alimentador em um número inteiro de amostras N_{spc} por ciclo do sistema. É calculada a corrente de diferença de um ciclo simples a fim de obter a quantidade DI_k , quantidade essa que é acumulada em seus valores absolutos durante vários ciclos de energia N_s .

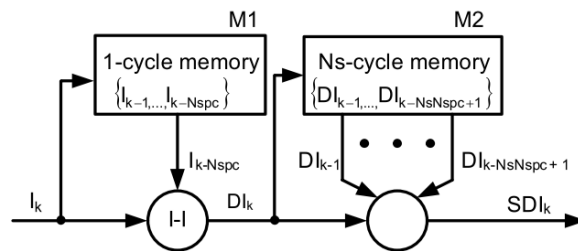


Figura 3.2: Cálculo da Soma de Corrente Diferencial (SDI) (Hou, 2007).

Com o intuito de exemplificar o cálculo da SDI, segue a Figura 3.3 que ilustra o cálculo no domínio do tempo para a forma de onda da corrente amostrada a $N_{spc} = 32$ amostras por ciclo. Vale ressaltar que, caso fosse uma forma de onda senoidal ideal, o cálculo da diferença de um ciclo resultaria em uma saída com todos os valores nulos. Entretanto, com a corrente de arco de uma FAI, a diferença de um ciclo de corrente revela a atividade do processo de arco, que é bastante aleatório.

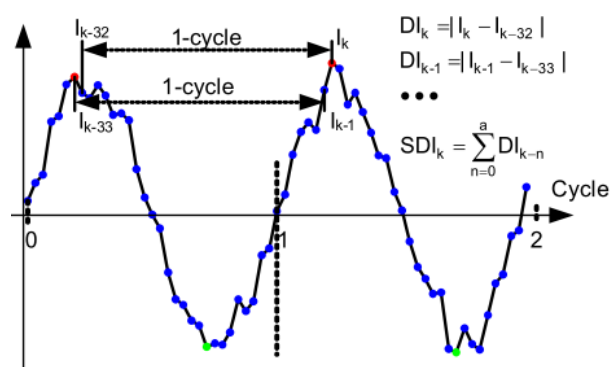


Figura 3.3: Ilustração do cálculo da SDI (Hou, 2007).

Matematicamente, os cálculos das diferenças de corrente (DI_k) e da soma de corrente diferencial (SDI) pode ser expressa pelas Equações 3.1 e 3.2:

$$DI_k = |I_k - I_{k-N_{spc}}| \quad (3.1)$$

$$SDI_k = \sum_{n=0}^a DI_{k-n} \quad (3.2)$$

onde a representa o número de amostras desejadas para a soma.

A Figura 3.4 representa a análise do domínio da frequência. É possível observar que a resposta de magnitude do cálculo da diferença de um ciclo tem um zero em cada frequência harmônica, incluindo a frequência DC e a frequência fundamental. Todos os componentes harmônicos são

removidos após o cálculo da diferença. O conteúdo em frequência da corrente de diferença contém apenas não harmônicos. Indubitavelmente, a SDI é uma ferramenta essencial na detecção de FAI, por representar uma medida do conteúdo não harmônico de uma corrente ao longo de uma janela de N_s ciclos.

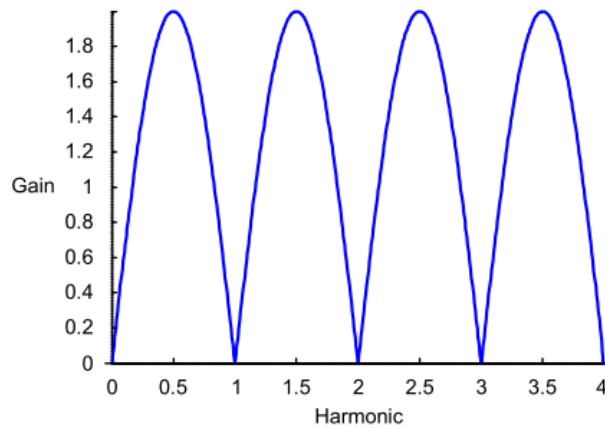


Figura 3.4: Resposta em frequência de magnitude de um ciclo de diferença de corrente para o quarto harmônico (Hou, 2007).

3.2.2 Filtro Digital

Quando uma FAI ocorre, a quantidade SDI aumenta. A magnitude desse aumento só pode ser avaliada na comparação com seu histórico. O segundo bloco é um tipo de filtro digital que visa estabelecer uma referência estável a SDI, denominada SDI_REF_k , e é fundamental para o sucesso do algoritmo de detecção.

Foi utilizada uma média de resposta infinita (IIR) com uma constante de tempo fixa suficientemente grande, com o mote de obter efeitos de memória a longo prazo e oferecer uma referência estável durante faltas. Da mesma maneira, uma constante pequena facilita um acompanhamento rápido durante condições sem falhas. Dessa maneira, para encontrar um equilíbrio e evitar que a média siga os picos grandes de SDI, a entrada de média é limitada quando o valor do SDI está acima de um limite. O design é ilustrado na Figura 3.5.

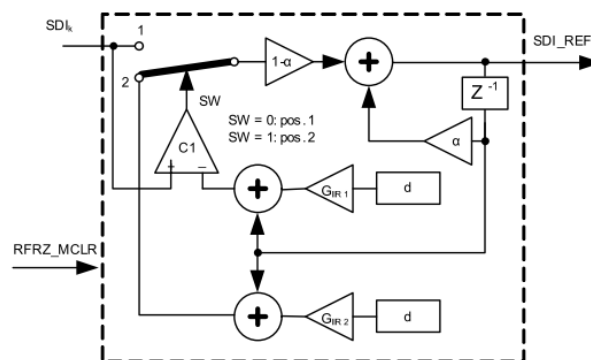


Figura 3.5: Filtro IIR (Hou, 2007).

A referência estável é calculada de acordo com a expressão geral:

$$SDI_REF_k = (1 - \alpha) \cdot x_{in} + \alpha \cdot SDI_REF_{k-1} \quad (3.3)$$

onde α se relaciona com a constante de tempo e x_{in} pode assumir dois valores a depender do comparador C_1 . Ao considerar essa comparação, o cálculo da referência é obtido a partir da Equação 3.4:

$$SDI_REF_k = \begin{cases} (1 - \alpha) \cdot SDI_k + \alpha \cdot SDI_REF_{k-1}, & SDI_k < G_{IIR1} \cdot d + SDI_REF_{k-1} \\ (1 - \alpha) \cdot G_{IIR2} \cdot d + \alpha \cdot SDI_REF_{k-1}, & \text{c.c} \end{cases} \quad (3.4)$$

A variável d está relacionada ao bloco de ajuste adaptativo. G_{IIR1} e G_{IIR2} são constantes que podem ser qualquer inteiro maior do que um. Para o cálculo de α , foi utilizada a Equação 3.5:

$$\alpha = e^{-\frac{1}{PR \cdot TC}} \quad (3.5)$$

onde TC é uma constante de tempo, escolhida como um segundo, e PR é a taxa de processamento, que é de 60 Hz para sistemas de potência.

Há ainda, conforme se observa na Figura 3.5, uma entrada de congelamento $RFRZ_MCLR$ para parar o cálculo da média sob condições diferentes de FAIs, caracterizadas por grandes variações nas correntes de fase e mudanças nas tensões de linha.

3.2.3 Tendência e Memória

O bloco de Tendência e Memória tem por objetivo registrar quaisquer alterações incomuns de SDI relacionadas à ocorrência de FAI no sistema e memorizar informações a serem fornecidas para o bloco de lógica e decisão. Na Figura 3.6, é possível ver o detalhamento do bloco.

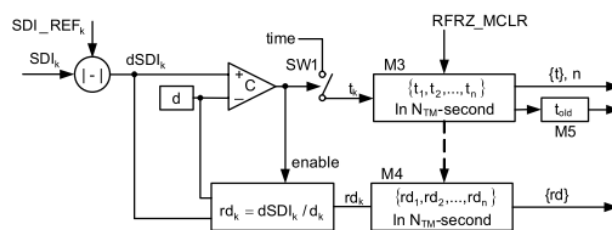


Figura 3.6: Função de Tendência e Memória (Hou, 2007).

É calculado, de início, o valor absoluto da diferença dSDI, entre SDI e SDI_REF. Caso essa diferença absoluta seja superior à margem d associada ao bloco de Ajuste Adaptativo, a saída do comparador assume valor lógico 1 e o algoritmo registra em uma memória M3 o momento em que a chave SW1 fecha. No início de cada segmento de N_{TM} segundos, caso o vetor armazenado na memória M3 seja não-nulo, a memória M5 armazena a variável t_{old} , seu último elemento.

A fim de permitir ao bloco de lógica de decisão determinar a existência de uma FAI, são fornecidos pelo bloco de Tendência e Memória as seguintes informações:

- O conjunto $\{t\}$, correspondente aos tempos em que a chave SW1 fechou;
- O vetor $\{rd\}$, correspondente à razão de desvio expressa por $dSDI_k/d_k$, salvo em uma memória M4;
- O valor de t_{old} ;
- O valor de n , como o número de vezes que SDI se afasta de SDI_REF mais a margem d nos segundos anteriores de N_{TM} .

3.2.4 Ajuste Adaptativo

A caracterização da quantidade de detecção do alimentador para suas cargas normais é o propósito da função de Ajuste Adaptativo. O bloco aprende uma margem d acima da média de SDI na qual o valor pode cair como resultado de operações normais do sistema. O design está expresso na Figura 3.7.

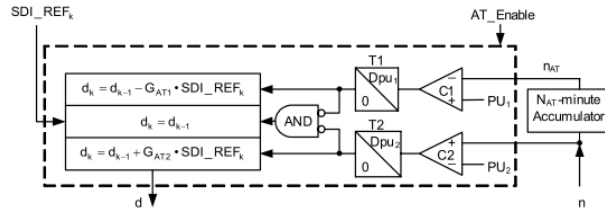


Figura 3.7: Função de Ajuste Adaptativo (Hou, 2007).

Existem duas entradas n e n_{AT} . A entrada n corresponde ao número de vezes que SDI se afastou da média mais a margem d nos segundos anteriores de N_{TM} , como explicitado anteriormente. Um acumulador adiciona todos os valores de n durante um período de tempo de N_{AT} e produz uma saída n_{AT} , que corresponde ao número de vezes que SDI se afastou da média mais a margem d nos minutos anteriores de N_{AT} .

A saída do primeiro comparador C1 assume valor lógico 1 caso n_{AT} seja superior a um limite PU_1 . Se a saída do comparador C1 mantiver esse valor lógico por um período consecutivo de Dpu_1 , a saída do temporizador T1 assume valor lógico 1, o que atualiza o cálculo da margem d conforme o caso (I) da Equação 3.6.

A saída do segundo comparador C2 assume valor lógico 1 caso n seja superior a um limite PU_2 . Se a saída do comparador C2 mantiver esse valor lógico por um período consecutivo de Dpu_2 , a saída do temporizador T2 assume valor lógico 1, o que atualiza o cálculo da margem d conforme o caso (II) da Equação 3.6.

Se ambas as saídas T1 e T2 forem lógicas 0, a porta AND produz uma saída lógica 1 e ativa

o cálculo da atualização conforme o caso (III) da Equação 3.6, isto é, o valor da margem d é mantido.

$$d_k = \begin{cases} d_k - G_{AT1} \cdot SDI_REF_k, & T1 \& \overline{T2} \quad (I) \\ d_k + G_{AT2} \cdot SDI_REF_k, & \overline{T1} \& T2 \quad (II) \\ d_{k-1}, & \overline{T1} \& \overline{T2} \quad (III) \end{cases} \quad (3.6)$$

A entrada AT_ENABLE habilita o cálculo da atualização da margem d . Idealmente, o processo de ajuste deve ocorrer continuamente na ausência de FAI no sistema.

3.2.5 Lógica de Decisão

O último bloco do algoritmo, cujo design está expresso na Figura 3.8, calcula um conjunto de diferenças de tempo $\{dt\}$ usando o conjunto de tempos $\{t\}$ e t_{old} , fornecidos pela função de Tendência e Memória. Essa diferença de tempo indica a característica temporal das assinaturas de FAIs. Foram utilizados comparadores e contadores para a lógica de decisão. Os contadores são separados para alarmes e disparos de FAIs. O contador T_F é para detecção de FAI. Já o contador T_A é para os alarmes de FAI.

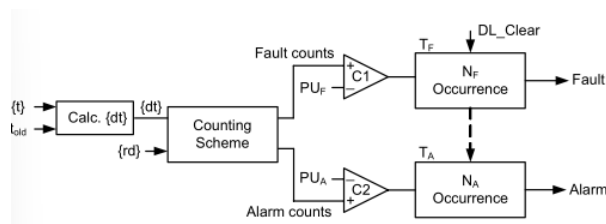


Figura 3.8: Função de Lógica de Decisão (Hou, 2007).

Para cada par $\{dt, rd\}$ no segmento anterior de N_{TM} segundos, um esquema de contagem determina se contar ou não e o número de contagens para uma falha ou um alarme. Se o número de contagens exceder PU_F , o comparador C1 produz uma saída lógica 1 e o contador T_F é incrementado. Se N_F ocorrências se acumulam dentro de um tempo de decisão, o contador T_F produz saída lógica 1 e sinaliza a detecção de uma FAI. O processo ocorre de forma semelhante para a detecção de um alarme.

A Figura 3.9 ilustra um plano rd-dt, o qual é dividido em três planos: Contagem de Falhas, Contagem de Alarmes e Sem Contagem. Se um par $\{dt, rd\}$ cair na região de Sem Contagem, o algoritmo não gera contagens. Se um par $\{dt, rd\}$ cair na região de Contagem de Alarmes, o algoritmo gera contagem apenas para alarmes de FAI. Se um par $\{dt, rd\}$ cair na região de Contagem de Falhas, o algoritmo gera contagens para ambas as condições de falta e alarme de FAIs.

Valores de SDI elevados e esporádicos, provenientes de manobras no sistema, como ligar bancos de capacitores ou ajustar reguladores de tensão, podem ser desconsiderados na contagem

visto que estão associados a grandes valores de dt . Eventos intensos e ativos de arco elétrico de FAI tendem a produzir valores elevados de SDI agrupados em um curto período de tempo, de modo que os pares relacionados $\{dt, rd\}$ tendem a cair na região de operação do esquema de contagem.

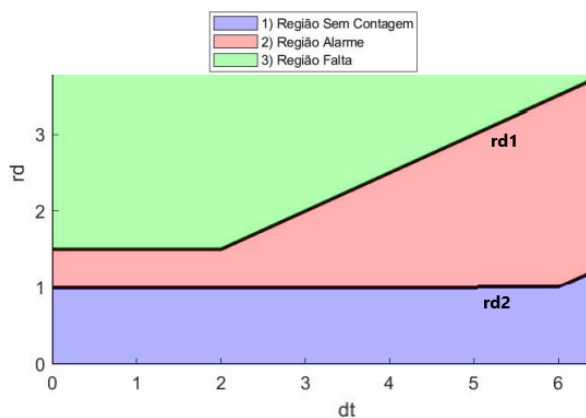


Figura 3.9: Regiões de Contagem.

As Equações 3.7 e 3.8 descrevem as funções que limitam os planos:

$$rd_1 = \begin{cases} 1.5, & \text{se } dt \leq 2 \\ 0.5 \cdot (dt - 2) + 1.5, & \text{se } dt > 2 \end{cases} \quad (3.7)$$

$$rd_2 = \begin{cases} 1, & \text{se } dt \leq 6 \\ 0.5 \cdot (dt - 6) + 1, & \text{se } dt > 6 \end{cases} \quad (3.8)$$

A entrada DL_Clear desabilita o bloco de lógica de decisão, pela ocorrência de condições de bloqueio tais como: elevadas correntes de fase, variações de tensão ou eventos que ocorrem nas três fases, haja vista que são improváveis de serem FAIs.

MODELAGEM DO ALIMENTADOR E DA FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA

4.1 ATPDRAW

O ATP (*Alternative Transients Program*) é um software útil para estudos de transitórios eletromagnéticos associados à sistemas de energia elétrica, o qual contém ferramentas que permitem a implementação e simulação de inúmeros modelos para transmissão e distribuição, segundo a necessidade do usuário.

O software possui diversos modelos para a representação dos elementos elétricos com o mote de implementar e simular sistemas elétricos de potência. O programa possui como base para sua formulação matemática o Método de Bergeron (Método das Características) para elementos com parâmetros distribuídos e a Regra de Integração Trapezoidal para parâmetros concentrados. Por ser um programa digital, o ATP não possibilita a obtenção de uma solução contínua no tempo, portanto são calculados valores a intervalos discretos no tempo (**Filho and Pereira, 1996**).

O ATPDraw é uma interface para a utilização do software ATP, o qual permite uma implementação gráfica elegante e bem elaborada dos modelos de sistemas elétricos, além de oferecer uma visualização do esquema elétrico da rede a ser simulada, o que facilita a utilização e interpretação dos dados apresentados por meio das simulações realizadas. É possível ainda fornecer dados para programas auxiliares, como o MATLAB, com o intuito de analisar os resultados e apresentá-los em formato gráfico.

No ATPDraw, há componentes passivos em conjunto com componentes do tipo TACS (*Transient Analysis of Control Systems*), os quais podem ser controlados por meio de variáveis, programadas por meio da linguagem MODELS. A MODELS é uma linguagem de programação no software ATP que possibilita a criação de novos componentes, além dos componentes pré-definidos. Isso ocorre através do detalhamento da estrutura do modelo e das funções de seus elementos. Tem sido utilizada frequentemente nas últimas décadas em trabalhos de modelagem de fenômenos de transitórios eletromagnéticos, ao permitir a modelagem de componentes específicos do sistema elétrico de potência, como os dispositivos de proteção.

A MODELS fornece o monitoramento e controle dos modelos de sistemas de potência no ATP. As tensões nos nós, estados das chaves e correntes nos ramos do sistema são variáveis que podem ser entradas para a linguagem, com o intuito de gerar sinais de saída a serem enviados para o ATP. Assim, o estado do modelo do sistema elétrico no ATP pode ser alterado de forma dinâmica em resposta às saídas da MODELS. Esse processo é chamado de simulação em malha

fechada, por meio do qual é possível a simulação da interação entre o sistema de potência e seus sistemas de medição, proteção e controle (Miguel, 2011).

4.2 REDE DE DISTRIBUIÇÃO ESTUDADA

A rede de distribuição estudada é um alimentador aéreo real da Neoenergia Brasília, apresentado na Figura 4.1. Ele possui característica radial, com cabos de alumínio (CA) na configuração convencional e compacta, o qual opera na tensão primária de 13,8 kV e na frequência de 60 Hz. Por ser o quarto circuito abastecido pela subestação 10, o alimentador analisado é denominado de 1004. Atende a área SHIS QL's 22, 24, 26, QI's 23, 25, 26, 27 e a área SMDB CJ's 23, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32 do Lago Sul. Possui potência instalada de 14583 kVA e atende 2639 clientes.

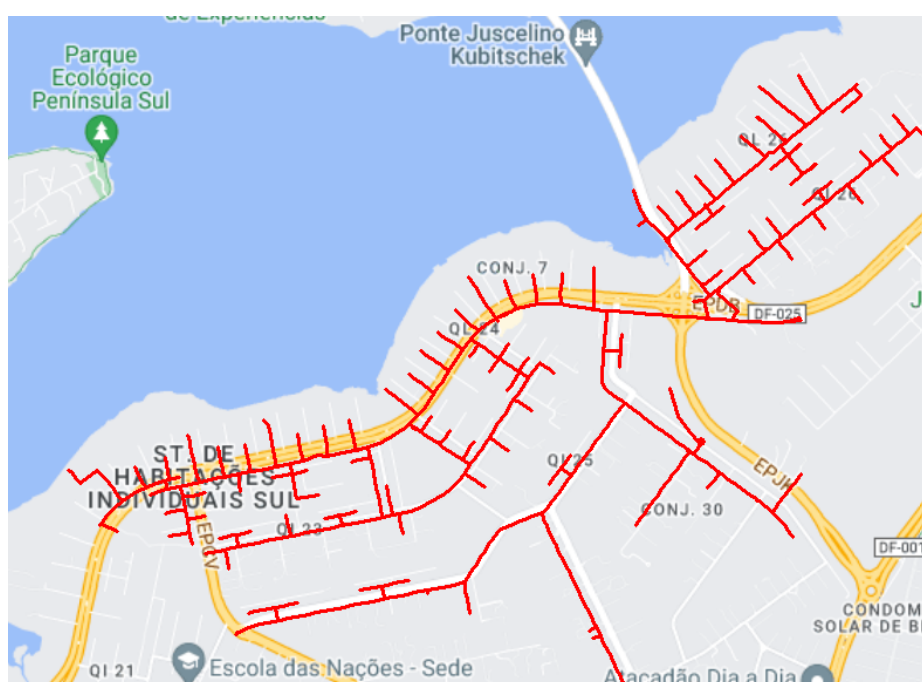


Figura 4.1: Alimentador 1004 da Neoenergia.

A subestação 10 da Neoenergia é abastecida por três linhas em 34,5 kV. Dessas, duas são provenientes da subestação Mangueiral (MG) e uma é proveniente da subestação do Paranoá (PA). Essa subestação possui dois transformadores abaixadores de tensão de 34,5 kV para 13,8 kV, ambos com potência nominal de 20 MVA, sendo que o carregamento em emergência é de 25 MVA. Do barramento de 13,8 kV da SE-10, saem 8 circuitos de distribuição aérea, sendo eles: 1001, 1002, 1003, 1004, 1005, 1006, 1007 e 1008. Possui também quatro bancos de capacitores para compensação de reativos, com potência reativa nominal de 2,4 MVAr.

4.2.1 Representação das Linhas

A configuração dos cabos presentes no alimentador 1004 se divide em duas classes: a rede convencional e a rede compacta.

1. Rede convencional: É a configuração mais tradicional e de menor custo. É nua por possuir condutores de alumínio sem alma de aço (CA), os quais são dispostos horizontalmente.

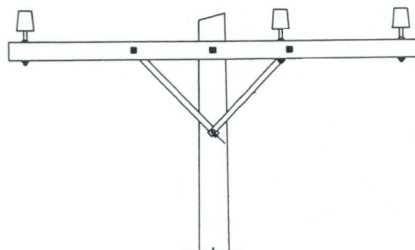


Figura 4.2: Rede convencional (CEB, NTD 2.12, 2011).

A Figura 4.2 mostra uma estrutura primária tipo N1, na qual os condutores passam lateralmente nos isoladores de porcelana.

2. Rede compacta: Essa configuração apresenta um cabo de aço, denominado "mensageiro"¹, e cabos protegidos ou cobertos, fixados por espaçadores losangulares, utilizados nas tensões de 34,5 kV e 13,8 kV pela concessionária.

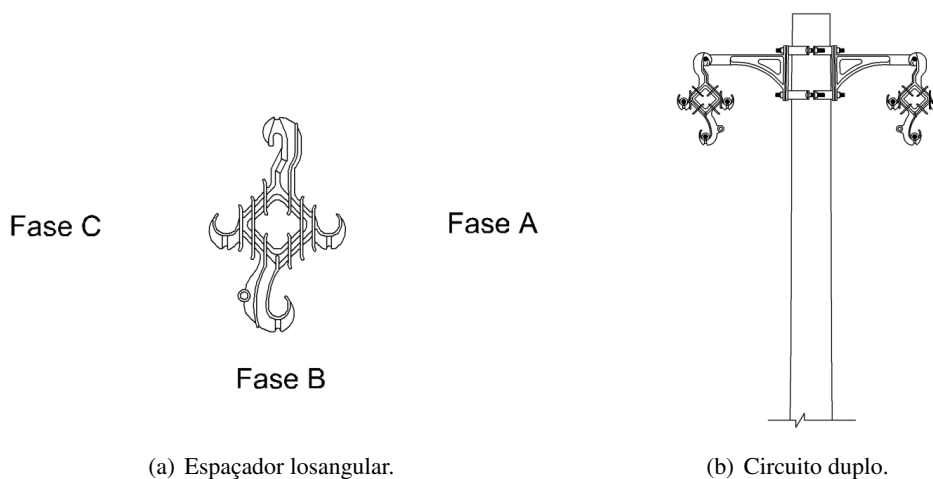


Figura 4.3: Rede compacta (CEB, NTD 2.06, 2011).

Na Figura 4.3, é possível observar a convenção para o posicionamento dos condutores em um espaçador polimérico e o padrão de construção de um circuito duplo.

¹Cabo mensageiro é um cabo de aço utilizado com fins de sustentação dos espaçadores e separadores e para a proteção eletromecânica nas redes compactas.

A configuração de rede compacta é recomendada em situações que requerem minimizar problemas relativos ao impacto ambiental, isto é, para redução dos contatos acidentais e como maneira de recrudescer a segurança e confiabilidade do fornecimento de energia elétrica. É preferível à configuração convencional em áreas urbanas devido à maior densidade de carga e edificações próximas à rede.

A Tabela 4.1 apresenta tanto a descrição dos cabos presentes no alimentador estudado como também as características elétricas utilizadas para a modelagem das linhas no ATP. As informações relativas à área, ao raio externo e a resistência elétrica dos condutores foram obtidas no catálogo técnico dos condutores de alumínio da ALUBAR.

Tabela 4.1: Descrição dos cabos.

| Descrição do Cabo | Comprimento Total [km] | Geometria | Área [mm ²] | Rout [cm] | Resis [Ω/km] |
|---------------------|------------------------|------------|-------------------------|-----------|--------------|
| 4 AWG | 16,02 | Horizontal | 21,12 | 0,2593 | 1,3605 |
| 2 AWG | 1,30 | Horizontal | 33,54 | 0,3267 | 0,8567 |
| 1/0 AWG | 0,32 | Horizontal | 53,52 | 0,4127 | 0,5369 |
| 4/0 AWG | 5,05 | Horizontal | 107,41 | 0,5847 | 0,2675 |
| 50 mm ² | 7,31 | Compacta | 50 | 0,3989 | 0,5807 |
| 185 mm ² | 5,34 | Compacta | 185 | 0,7674 | 0,1545 |

Na simulação, foi utilizado o elemento *LCC template* para agrupar os trechos de linha com o mesmo arranjo, conforme a Figura 4.4. Dessa maneira, reduziu-se o número de elementos para cada vão de rede, o que permitiu simplificar a modelagem, assegurando a representatividade do circuito.

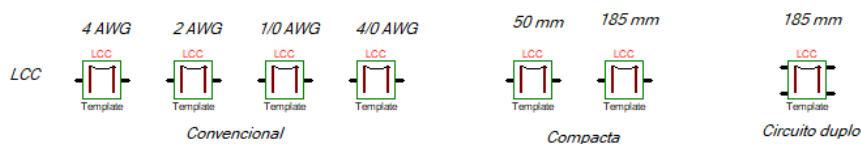


Figura 4.4: LCC template.

No presente trabalho, para a criação dos templates, foram inseridas as seguintes informações:

- Consideração do efeito skin;
- Modelo Pi equivalente a parâmetros concentrados como tipo de representação da linha;
- Parâmetros elétricos dos cabos: raio interno, externo e resistência DC por quilômetro;
- Resistividade do solo de 350 Ω.m;

- Frequência de operação em 60 Hz;
- Distância horizontal e distância vertical relativas à representação geométrica dos condutores.

Fez-se necessária a criação de um template para a construção de um circuito duplo, haja vista que cerca de 3,65 quilômetros do tronco do alimentador de arranjo 185 mm^2 é compartilhado pela mesma estrutura de rede com o circuito 1008, com potência instalada de 16429 kVA. Para tanto, foram representados seis condutores para esse trecho de rede, sendo três para cada alimentador, o que considera o acoplamento elétrico entre eles.

Para a criação dos trechos do alimentador, foi utilizado o elemento *LCC section*. A única ação necessária foi selecionar o template correspondente, de acordo com o tipo de rede existente no local e o comprimento do segmento, em quilômetros.

4.2.2 Representação dos Transformadores

Considera-se que os clientes atendidos pelo alimentador 1004 possuem majoritariamente padrão de entrada trifásico, por serem precipuamente grandes residências e empreendimentos comerciais. Na simulação, empregou-se o elemento *RLCD3* para a modelagem das cargas, com as seguintes características:

- Cargas trifásicas conectadas em delta;
- Fator de potência de 0,92 indutivo;
- Modelo de impedância constante;
- Tensão nominal de 13,8 kV. Não foi modelada a rede de baixa tensão, haja vista que as cargas conectadas na baixa tensão foram referenciadas na média tensão;
- Fator de utilização de 100%;
- Para a consideração do desequilíbrio entre as fases, foram aplicados fatores entre as fases A, B e C de 1, 0,8 e 0,9 respectivamente.

As Equações 4.1 e 4.2 resumem o cálculo da impedância equivalente (resistência e reatância). A Tabela 4.2 abaixo apresenta tanto uma descrição dos transformadores presentes no alimentador 1004, como também a impedância obtida.

$$R = 3 \times \frac{V^2}{S_{3\phi} \times fp} \quad (4.1)$$

$$X = 3 \times \frac{V^2}{S_{3\phi} \times \text{sen}(\text{acos}(fp))} \quad (4.2)$$

Em que:

V = Tensão de linha da rede

$S_{3\phi}$ = Potência nominal do transformador

fp = Fator de potência

Tabela 4.2: Descrição dos transformadores.

| Potência Nominal [kVA] | Quantidade | P [kW] | Q [kVAr] | R [Ω] | X [Ω] |
|------------------------|------------|--------|----------|----------------|----------------|
| 15 | 8 | 13,8 | 5,88 | 41400 | 97183,51 |
| 30 | 20 | 27,6 | 11,76 | 20700 | 48591,75 |
| 45 | 41 | 41,4 | 17,64 | 13800 | 32394,50 |
| 75 | 48 | 69 | 29,39 | 8280 | 19436,70 |
| 112 | 7 | 103,04 | 43,89 | 5544,64 | 13015,65 |
| 150 | 3 | 138 | 58,79 | 4140 | 9718,35 |
| 225 | 4 | 207 | 88,18 | 2760 | 6478,90 |

Para a criação dos transformadores do alimentador, foi necessário armazenar, em variáveis, os dados de resistência, indutância e capacitância por fase, sendo que a última foi tomada como nula. Ademais, cada transformador foi identificado com uma label no padrão $TRXXXX/S_nT$, em que "XXXX" corresponde ao código de placa e S_n corresponde à sua potência nominal.

A Figura 4.5 mostra o alimentador 1004 modelado no software ATPDraw.

Após a montagem, foi possível verificar se os níveis de tensão em pontos extremos do alimentador, indicados na Figura 4.5 como 1, 2, 3 e 4, respeitam os valores definidos pela ANEEL, os quais são apresentados na Tabela 4.3 a seguir.

Tabela 4.3: Pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou superior a 2,3 kV e inferior a 69 kV (ANEEL, 2021).

| Tensão de Atendimento | Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR) |
|-----------------------|--|
| Adequada | $0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$ |
| Precária | $0,90TR \leq TL < 0,93TR$ |
| Crítica | $TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$ |

Tabela 4.4: Níveis de tensão em pontos extremos do alimentador.

| Ponto | Va (pu) | Vb (pu) | Vc (pu) |
|-------|---------|---------|---------|
| 1 | 0,9816 | 0,9810 | 0,9801 |
| 2 | 0,9771 | 0,9767 | 0,9758 |
| 3 | 0,9754 | 0,9750 | 0,9742 |
| 4 | 0,9756 | 0,9751 | 0,9743 |

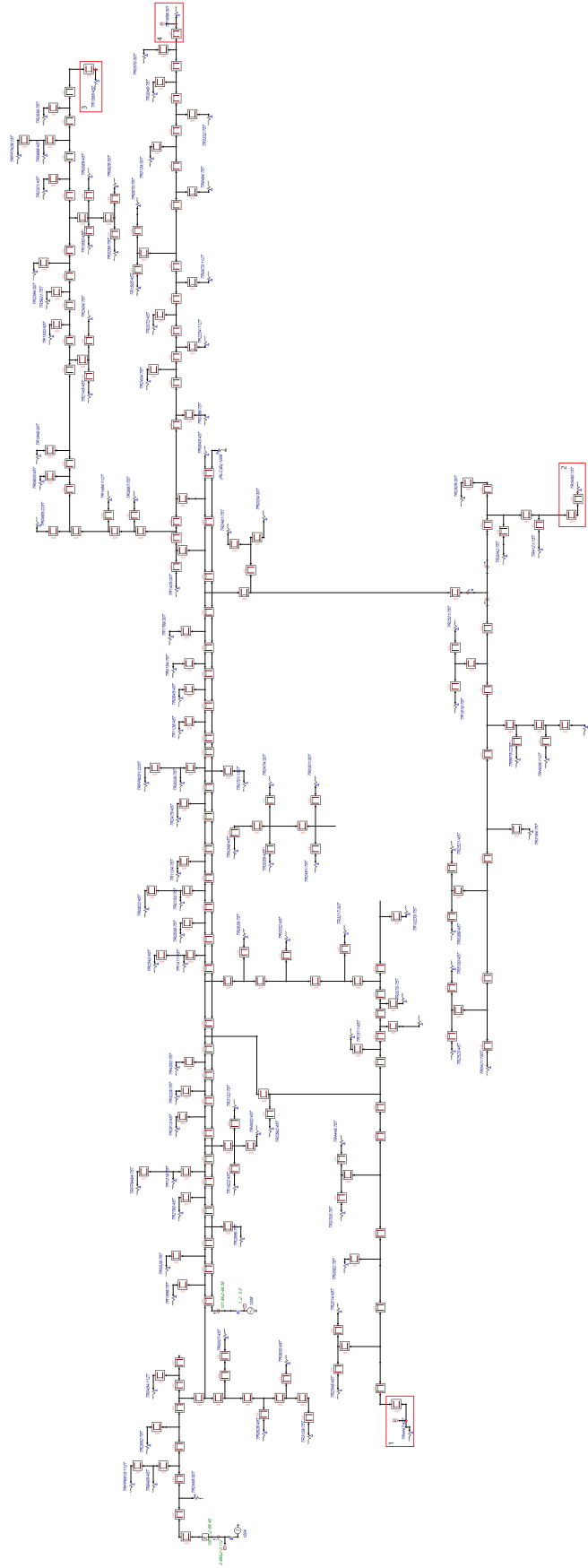


Figura 4.5: Alimentador 1004 modelado no ATPDraw.

Os valores de tensão presentes na Tabela 4.4 foram obtidos a partir do elemento *Open voltage probe* do ATP. Foi utilizada uma escala igual à tensão de base, que equivale à tensão de pico por fase, de modo a se obter os valores em por unidade, conforme a Equação 4.3:

$$V_{\text{base}} = \frac{13,8}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} \quad (4.3)$$

A título comparativo, a Tabela 4.5 fornece valores RMS de medições reais médias de corrente do alimentador, obtidos a partir da plataforma SCADA e os valores obtidos na simulação em regime permanente no ATP.

Tabela 4.5: Níveis de corrente do alimentador na saída da subestação.

| Ponto | Ia (A) | Ib (A) | Ic (A) |
|----------------|--------|--------|--------|
| SCADA (Real) | 115,00 | 112,94 | 115,66 |
| ATP (Simulado) | 106,60 | 113,67 | 119,07 |

A partir das Tabelas 4.4 e 4.5, percebe-se que a escolha de um fator de utilização unitário e um fator de potência de 0,92 indutivo garantem uma boa representação do sistema de distribuição real, assegurando que os valores de tensão permaneçam dentro da faixa adequada, conforme estabelecido pela ANEEL.

4.3 MODELAGEM DA FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA

Para que o alimentador modelado possibilite a avaliação de funções de detecção de FAIs, fez-se necessário reproduzir um modelo que simula as principais características do sistema, segundo apresentado na Seção 2.1, após o rompimento de um condutor (uma fase de alimentação primária) e o contato deste com o solo no lado da fonte.

Como referência para o trabalho, foi escolhido o modelo de **Emanuel et al. (1990a)**, haja vista que possui simples implementação e permite a escolha de parâmetros com base na literatura. O Modelo de Emanuel original possibilita a representação das características de assimetria e não-linearidade das FAIs, entretanto não reúne as características de *buildup*, *shoulder* e intermitência.

Com o intuito de simular todas as características da corrente de FAI, foi proposta a configuração da Figura 4.6. Os elementos do ATPDraw utilizados para a construção do modelo são: *SPLITTER*, *COLLECT*, *SWIT_3XT*, *TSWITCH*, *NLRES91*, *DIODE*, *DC1PHUG* e *NTYPE94N*. A função de cada um dos elementos é apresentada abaixo:

- *SPLITTER*: Por ser um divisor entre um nó trifásico e três nós monofásicos (OUTA, OUTB e OUTC), foi utilizado para separar as três fases do alimentador (lado FONTE);
- *COLLECT*: Permite agrupar os três nós monofásicos em um único nó trifásico, a fim de conectar o lado CARGA;

- *SWIT_3XT*: Corresponde à Chave 1. É uma chave trifásica controlada por tempo que permite simular o rompimento do condutor em uma das fases, sendo escolhida a fase C;
- *TSWITCH*: Corresponde à Chave 2. É uma chave monofásica controlada por tempo com opção de religamento. Visa reproduzir as características de *shoulder* e intermitência;
- *NLRES91*: É um resistor não linear com resistência variante no tempo. Visa reproduzir a característica de *buildup*;
- *DIODE*: O diodo funciona como uma chave que permite a condução de corrente a depender das tensões das fontes em série. A coordenação dos diodos antiparalelos é responsável pelas características de não-linearidade e assimetria. Foi utilizada sua configuração padrão;
- *DC1PHUG*: Fontes de tensão contínua não aterrada;
- *NTYPE94N*: Blocos *Norton Type-94*, que visam modelar indutores, com o mote de se evitar oscilações numéricas inerentes ao método de integração trapezoidal. Foram programados na linguagem MODELS, mediante o método de integração numérica de segunda ordem de Gear. O código utilizado para programar os blocos é apresentado no Apêndice A.

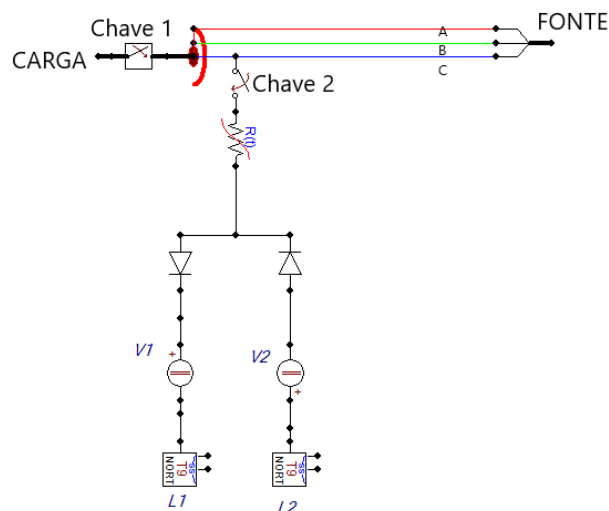


Figura 4.6: Modelo de FAI proposto.

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O presente capítulo visa apresentar os resultados que foram obtidos a partir de simulações no software ATP do alimentador de distribuição modelado, de modo a avaliar o algoritmo de detecção de faltas de alta impedância estudado.

De início, são levantadas as características utilizadas nas simulações, as variáveis presentes nos elementos representativos das linhas e cargas, além das metodologias para a definição dos parâmetros do modelo de FAI utilizado. Posteriormente, é feita uma descrição de como cada bloco do algoritmo apresentado na Figura 3.1 foi programado na linguagem MATLAB e as simplificações realizadas. Por fim, será realizada uma análise da inserção do defeito, avaliando tanto a representatividade do modelo de FAI utilizado quanto o desempenho do algoritmo na detecção da falha.

5.1 PARÂMETROS UTILIZADOS NA MODELAGEM

5.1.1 Parâmetros de Simulação

Em primeiro lugar, nas configurações do ATP, o tipo de simulação selecionado foi no domínio do tempo, com a inserção dos seguintes parâmetros:

- ΔT : Representa o passo de tempo da simulação em segundos, isto é, o intervalo de tempo entre as iterações sucessivas, referentes à discretização do tempo. Quanto menor o parâmetro, mais precisa a simulação, pois permite capturar variações mais detalhadas nos sinais ao longo do tempo;
- T_{\max} : Refere-se ao tempo total da simulação em segundos;
- X_{opt} : Essa configuração permite flexibilidade na definição das indutâncias do sistema. Caso $X_{\text{opt}} = 0$, as indutâncias do sistema são consideradas em *miliHenry* (mH). Caso contrário, as indutâncias do sistema são interpretadas em *Ohms* (Ω) e X_{opt} é considerada como a frequência do sistema, em Hz;
- C_{opt} : Essa configuração permite flexibilidade na definição das capacitâncias do sistema. Caso $C_{\text{opt}} = 0$, as capacitâncias do sistema são consideradas em *microFarad* (μF). Caso contrário, as capacitâncias do sistema são interpretadas em *micro-mhos* (μS) e C_{opt} é considerada como a frequência do sistema, em Hz;

- Epsilon: Parâmetro que controla como o ATP trata problemas de singularidade na matriz do sistema. Se for nulo, o ATP utiliza um valor padrão. Tradicionalmente, o valor 1×10^{-8} é utilizado e possui impacto para não-linearidades;
- Frequency: Refere-se à frequência de operação do sistema, em Hertz (Hz). É utilizado em conjunto com os parâmetros X_{opt} e C_{opt} quando não são iguais a zero para considerar os elementos indutivos e capacitivos.

Os parâmetros utilizados estão presentes na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Parâmetros da Simulação.

| Parâmetro | Valor |
|-----------|--------------------|
| delta T | 1×10^{-5} |
| T_{max} | 2 |
| X_{opt} | 60 |
| C_{opt} | 60 |
| Epsilon | 1×10^{-8} |
| Frequency | 60 |

5.1.2 Parâmetros da Fonte AC

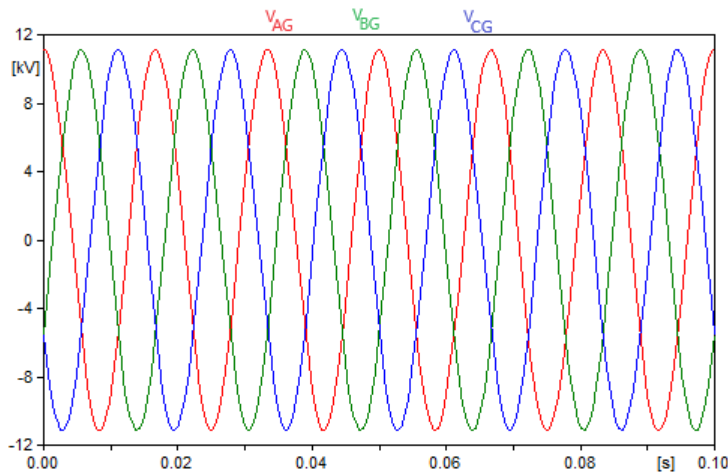
A subestação 10 foi modelada utilizando um suprimento em cada primário, especificamente para os alimentadores 1004 e 1008. Nesse contexto, foi empregado o elemento *ACSOURCE*, representando uma fonte de tensão alternada, em conjunto com o elemento *LINERL3S*, que representa uma impedância equivalente de Thévenin associada ao barramento de 13,8 kV.

Na aba *Data* do elemento *ACSOURCE*, fonte de tensão trifásica aterrada, foram inseridos os seguintes parâmetros, reunidos na Tabela 5.2.

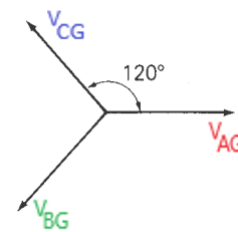
- AmplitudeA: O valor de pico de tensão das fases A, B, C;
- Frequency: Refere-se à frequência de operação do sistema, em Hertz (Hz);
- PhaseAngleA: Ângulo de fase da fase A, com um deslocamento de 120° de acordo com a sequência positiva ABC de fasores de tensão;
- StartA: Tempo inicial, em segundos. O valor da amplitude é zero para $t < \text{StartA}$;
- StopA: Tempo final, em segundos. O valor da amplitude é zero para $t > \text{StopA}$.

Tabela 5.2: Dados para a fonte de tensão AC.

| Dado | Valor |
|-------------|---------|
| AmplitudeA | 13800 V |
| Frequency | 60 Hz |
| PhaseAngleA | 0° |
| StartA | -1 s |
| StopA | 100 s |



(a) Tensões de fase com V_{AG} como referência



(b) Diagrama fasorial para sequência positiva

Figura 5.1: Valores pico de tensão de fase: Aba Plot ATPDraw.

Seguem os atributos da aba *Data* do elemento *LINERL3S*. Os dados presentes na Tabela 5.3 foram obtidos por meio de análise de curto-circuito da distribuidora.

- R_0 : Impedância de sequência zero (parte real);
- L_0 : Impedância de sequência zero (parte imaginária);
- R_+ : Impedância de sequência positiva (parte real);
- L_+ : Impedância de sequência positiva (parte imaginária).

Tabela 5.3: Dados de Impedância de Curto para a SE 10.

| Dado | Valor |
|-------|--------------------|
| R_0 | 0,00001 Ω/m |
| L_0 | 0,14547 Ω/m |
| R_+ | 0,09854 Ω/m |
| L_+ | 0,44483 Ω/m |

5.1.3 Parâmetros do LCC Template

Na aba *Data* do LCC template, foram inseridos os parâmetros descritivos dos cabos, conforme a Tabela 4.1, e os parâmetros para a configuração geométrica, apresentados nas Tabelas 5.4 e 5.5.

- Rout: Raio externo (em centímetros) de um condutor;
- Resis: Resistência DC do condutor em Ohms por quilômetro;
- Rin: Raio interno (em centímetros) de um condutor. Considerado nulo;
- Horiz: Distância horizontal (m ou pé) do centro do feixe até uma linha de referência selecionável pelo usuário;
- Vtower: Altura vertical do cabo na torre (em metros);
- Vmid: Altura vertical do ponto médio correspondente a uma fração da altura da torre. Foi considerado por simplificação que $V_{mid} = V_{tower}$.

Tabela 5.4: Dados para Template de Rede Convencional e Compacta com Circuito Simples.

| Circuito | Convencional | | | Compacta Simples | | |
|----------|--------------|------------|----------|------------------|------------|----------|
| | Horiz [m] | Vtower [m] | Vmid [m] | Horiz [m] | Vtower [m] | Vmid [m] |
| 1 | 0 | 9,4 | 9,4 | 0 | 9,25 | 9,25 |
| 2 | 1,5 | 9,4 | 9,4 | 0,096 | 9,1 | 9,1 |
| 3 | 2,2 | 9,4 | 9,4 | 0,192 | 9,25 | 9,25 |

Tabela 5.5: Dados para Template de Rede Compacta com Circuito Duplo.

| Circuito | Horiz [m] | Vtower [m] | Vmid [m] |
|----------|-----------|------------|----------|
| 1 | 0 | 9,25 | 9,25 |
| 2 | 0,096 | 9,1 | 9,1 |
| 3 | 0,192 | 9,25 | 9,25 |
| 4 | 0,71 | 9,25 | 9,25 |
| 5 | 0,806 | 9,1 | 9,1 |
| 6 | 0,902 | 9,25 | 9,25 |

Após a inserção dos parâmetros, foi possível observar a representação geométrica dos condutores na aba *View* do ATPDraw, conforme a Figura 5.2.

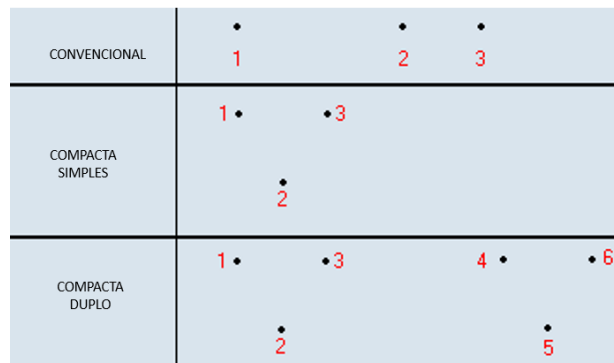


Figura 5.2: Disposição dos Condutores: *View ATPDraw*.

5.1.4 Parâmetros das Cargas RLCD3

Para o modelo das cargas no sistema, foi necessário incorporar os valores de resistência, indutância e capacitância, sendo que o último foi assumido como sendo nulo. Na aba VARIABLES, foram criadas variáveis com o padrão de identificação RS_nPhase para as resistências e XS_nPhase para as reatâncias, em que S_n corresponde à potência nominal do transformador e $Phase$ corresponde à fase: A, B ou C. Para que os parâmetros RLC pudessem ser parametrizados como variáveis no ATP, foi necessário selecionar a opção *Use internal parser* na aba de simulação, com o mote de utilizar um analisador interno.

A Tabela 5.6 reúne as variáveis utilizadas na modelagem das cargas, o que permite alterações nos valores de impedância sem a necessidade de acessar cada elemento *RLCD3* individualmente.

Tabela 5.6: Variáveis para o elemento *RLCD3* para a fase A. Valores em Ohms.

| NAME | EXPRESSION |
|-------|------------|
| R15A | 41400 |
| R30A | 20700 |
| R45A | 13800 |
| R75A | 8280 |
| R112A | 5544,64 |
| R150A | 4140 |
| R225A | 2760 |
| X15A | 97183,51 |
| X30A | 48591,75 |
| X45A | 32394,50 |
| X75A | 19436,70 |
| X112A | 13015,65 |
| X150A | 9718,35 |
| X225A | 6478,90 |

5.2 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO DE FALTA DE ALTA IMPEDÂNCIA

Nesta seção serão apresentados os métodos para se definir cada parâmetro do modelo de FAI. Seguidamente, serão apresentadas as curvas das correntes de falta e fase em que ocorreu a falta de alta impedância.

5.2.1 Configurações

5.2.1.1 Instante do Rompimento do Condutor

Conforme citado na Seção 4.3, o elemento *SWIT_3XT* corresponde a uma chave trifásica controlada por tempo utilizada para simular o rompimento do condutor de uma das fases. Para a reprodução desse comportamento, segue sua configuração na Tabela 5.7:

- T-cl_Phase: Tempo de fechamento da chave em segundos. Fase 1 (A), Fase 2 (B) ou Fase 3 (C);
- T-op_Phase: Tempo de abertura da chave em segundos. Fase 1 (A), Fase 2 (B) ou Fase 3 (C).

Tabela 5.7: Dados de tempo, em segundos, para a configuração da chave trifásica.

| DATA | VALUE |
|--------|-------|
| T-cl_1 | -1 |
| T-op_1 | 1000 |
| T-cl_2 | -1 |
| T-op_2 | 1000 |
| T-cl_3 | -1 |
| T-op_3 | 0,1 |

O instante do rompimento do condutor foi escolhido como $t = 0,1$ s, que corresponde ao parâmetro T-op_3 da chave *SWIT_3XT*. Quando $t = T-op_3$, a chave abre a fase C do lado CARGA.

5.2.1.2 Tempo de Queda, Início da FAI e Intermitências

Conforme citado na Seção 4.3, o elemento *TSWITCH* corresponde a uma chave monofásica controlada que visa dar início à falta. A existência da opção de religamento *Reclosing switch* permite simular a intermitência da corrente de FAI, por meio de sucessivas aberturas e fechamentos da chave. Para a reprodução desse comportamento, segue sua configuração na Tabela 5.8:

Tabela 5.8: Dados de tempo, em segundos, para a configuração da chave monofásica.

| DATA | VALUE |
|------|-------|
| T-cl | 1,48 |
| T-op | 0 |

Tabela 5.9: Característica *Reclosing switch*.

| T-close[s] | T-open[s] |
|------------|-----------|
| 1,48 | 1,547 |
| 1,601 | 10 |

Ao considerar uma altura de 9,4 metros entre a rede primária e o solo e a Equação 2.1, o tempo de queda considerado foi de 1,38 s. O instante de início da falta corresponde ao instante de rompimento do condutor t_1 somado ao tempo de queda do cabo ao solo, logo o instante de início da FAI $t_2 = 1.48$ s. Quando $t = t\text{-cl}$, a chave fecha.

$$t_2 = t_1 + t_{queda} = 0,1 + 1,38 = 1,48 \text{ s} \quad (5.1)$$

No instante $t = 1,547$ s a chave abre e no instante $t = 1,6$ s fecha novamente, permanecendo normalmente fechada até o final da simulação. Esse comportamento simula a situação real em que o condutor não mantém inicialmente um contato elétrico firme com a superfície.

Os instantes de intermitência, assim como o instante de rompimento do condutor, foram escolhidos de maneira aleatória. A intermitência ocorre 4 ciclos após o início da FAI e dura 3,25 ciclos.

$$t_3 = t_2 + 4 * \frac{1}{60} = 1,547 \text{ s} \quad (5.2)$$

$$t_4 = t_3 + 3.25 * \frac{1}{60} = 1,601 \text{ s} \quad (5.3)$$

5.2.1.3 Corrente de FAI

A falta de alta impedância gera diferentes níveis de corrente, dependendo da superfície de contato. A Tabela 5.10 a seguir reúne valores de corrente para diferentes superfícies, obtidos por Santos (2011) em estudos de comportamento de sinais reais de FAI, extraídos de ensaios de campo realizados, em 2010, em uma fazenda a cerca de 15 km da subestação da cidade de Boa Vista, PB.

Os testes foram realizados em seis tipos de superfícies de contato, em condições secas e molhadas, as quais eram compostas de pequenas áreas paralelas e revestidas de grama, calçamento, brita, asfalto, areia, solo local. Foi utilizado um poste de transição próximo às superfícies de contato a fim de diminuir os esforços mecânicos no cabo proveniente do poste da concessionária existente no lote, no qual havia um elo fusível. Para a captura dos sinais de tensão e corrente produzidos pelas FAIs, foram instalados no poste de transição um transformador de potencial (TP) e um transformador de corrente (TC).

Seguem as principais considerações a respeito dos ensaios:

- Os arcos elétricos referentes às superfícies "asfalto", "brita" e "solo local" secas foram imperceptíveis;
- As superfícies "asfalto" e "calçamento" molhadas produziram arcos elétricos fracos, sem rompimento do elemento fusível;
- As superfícies "solo local" e "grama" molhadas produziram fortes arcos elétricos, o que resultou na atuação do elo fusível.

Tabela 5.10: Níveis das correntes de falta (Santos, 2011).

| Superfície | Condição | Corrente (A) |
|------------|----------|--------------|
| Grama | Seca | < 60 |
| | Molhada | < 90 |
| Calçamento | Seco | < 10 |
| | Molhado | < 20 |
| Brita | Seca | - |
| | Molhada | < 50 |
| Asfalto | Seco | - |
| | Molhado | < 20 |
| Areia | Seca | < 10 |
| | Molhada | < 50 |
| Solo local | Seco | - |
| | Molhado | < 60 |

A corrente apresentada na Tabela 5.10 corresponde ao pico de corrente do semiciclo positivo. Pode-se calcular a impedância de falta pela Equação 5.4, ao considerar V_1 a amplitude, em Volts, da fonte de tensão DC que representa o semiciclo positivo.

$$Z_{falta} = \frac{(V_{fase_{max}} - V_1)}{I_{FAI}} \quad (5.4)$$

As Tabelas 5.11 e 5.12 a seguir apresentam os parâmetros de configuração para as duas fontes DCIPHUG.

Tabela 5.11: Parâmetros Fonte V_1 .

| DATA | VALUE |
|-----------|--------|
| Amplitude | 5000 V |
| Tstart | -1 s |
| Tstop | 1000 V |

Tabela 5.12: Parâmetros Fonte V_2 .

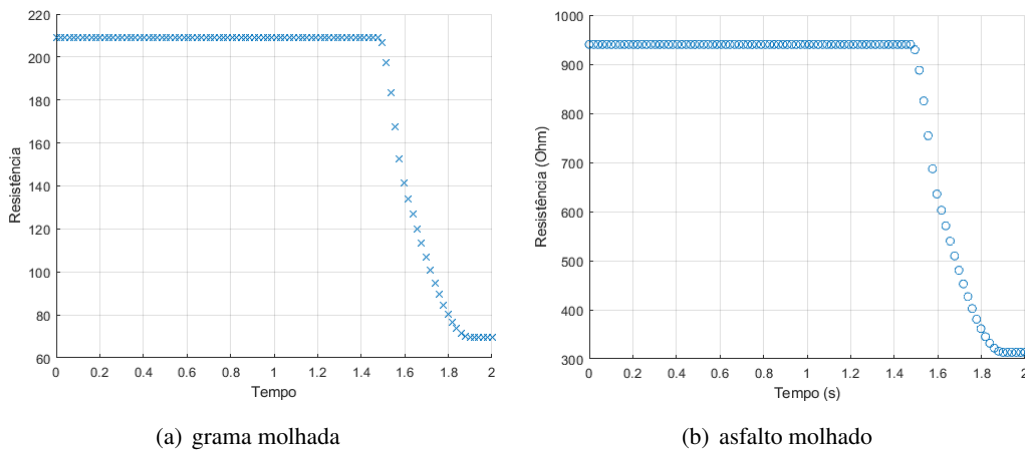
| DATA | VALUE |
|-----------|--------|
| Amplitude | 7000 V |
| Tstart | -1 s |
| Tstop | 1000 s |

Conforme citado na Seção 4.3, o elemento *NLRES91* corresponde a um resistor não linear com resistência variante no tempo o qual reproduz a característica de *buildup* da corrente de FAI. Serão simuladas faltas em duas superfícies: asfalto molhado e grama molhada. Primeiramente, calcula-se as impedâncias de falta correspondentes:

$$Z_{grama} = \frac{\left(\frac{13800}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} - 5000\right)}{90} = 69,64 \Omega \quad (5.5)$$

$$Z_{asfalto} = \frac{\left(\frac{13800}{\sqrt{3}} \times \sqrt{2} - 5000\right)}{20} = 313,38 \Omega \quad (5.6)$$

Para reproduzir a característica de *buildup* da corrente de falta, foi utilizada uma função de interpolação para a aproximação dos pontos de resistências $R(t)$, para ambos os casos, conforme a Figura 5.3.

**Figura 5.3:** Pontos correspondentes à aproximação para a resistência $R(t)$.

5.3 SIMULAÇÃO DA FAI

Para a simulação da falta de alta impedância na fase C no sistema de distribuição modelado, foi definido o seguinte ponto de inserção de defeito, ilustrado na Figura 5.4. Essa região corresponde a uma rede de configuração convencional, com arranjo 4/0 AWG. Possui maior probabilidade de

ocorrência de FAIs se comparada a uma região com configuração de rede compacta, que possui maior segurança e confiabilidade.

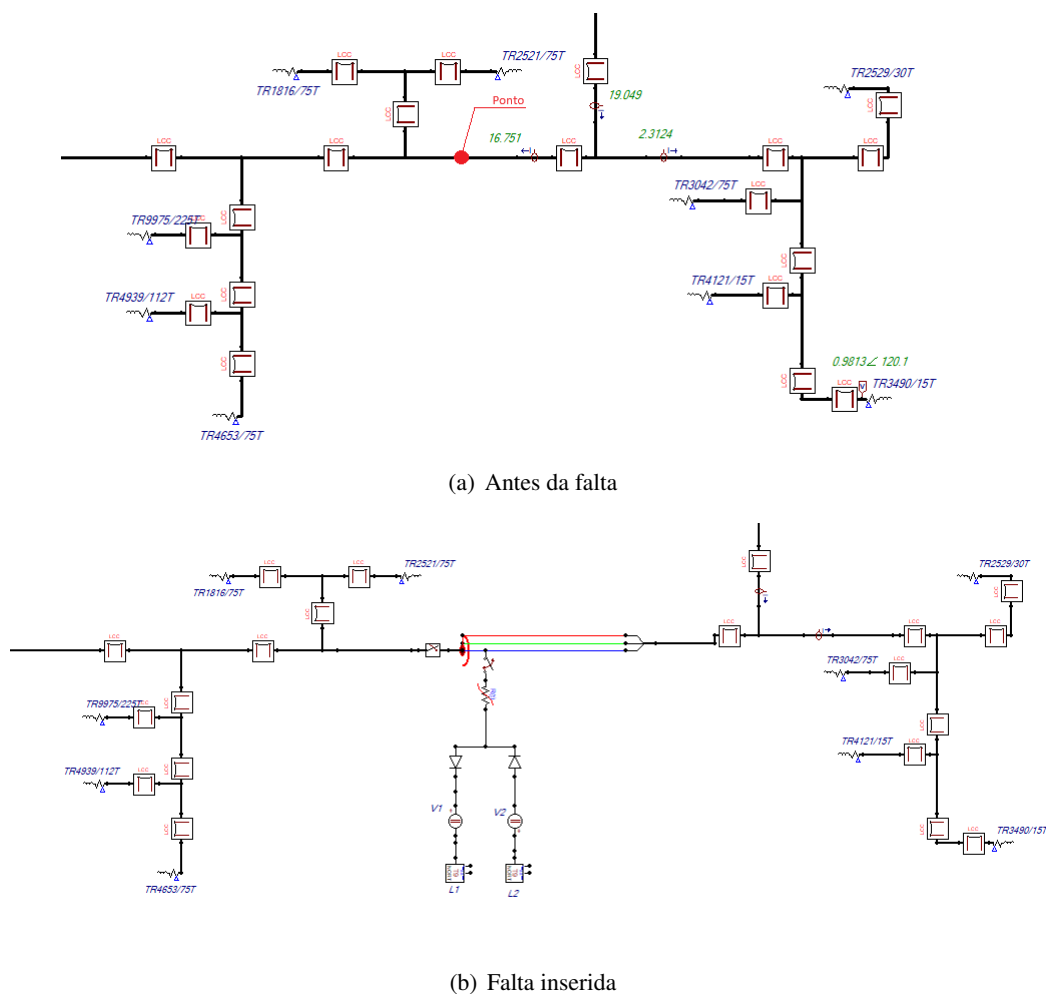


Figura 5.4: Ponto de inserção de defeito.

A seguir são analisados os sinais de corrente para um caso de FAI em grama molhada ($I_{FAI} < 90$ A) e para um caso de FAI em asfalto molhado ($I_{FAI} < 20$ A).

5.3.1 Superfície 1: Grama Molhada

A Figura 5.5 ilustra a curva de corrente no alimentador das fases A, B e C. É perceptível uma variação na corrente do alimentador da fase defeituosa C.

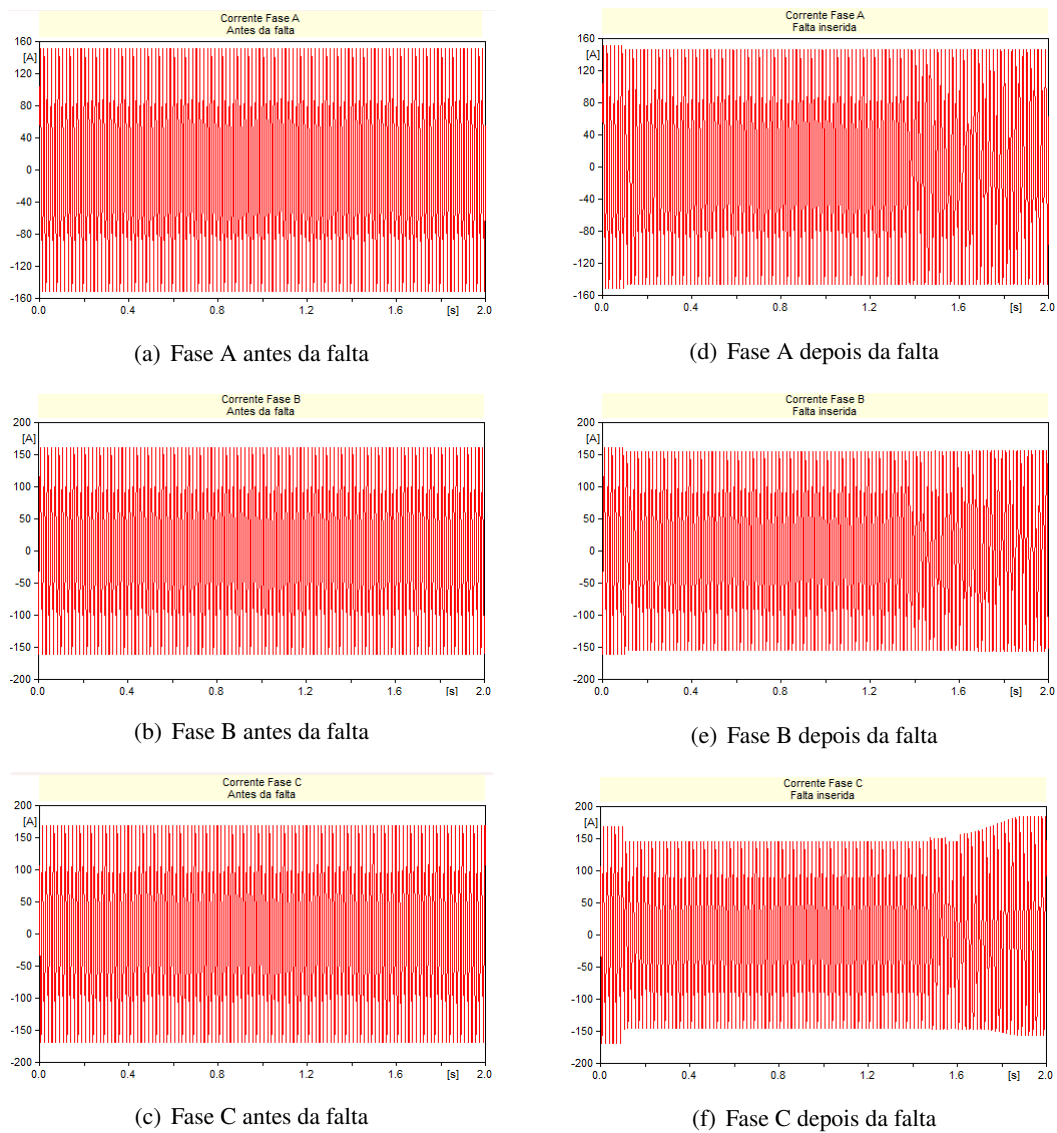


Figura 5.5: Corrente do alimentador antes e depois da falta.

Abaixo, segue a Figura 5.6 que ilustra a curva de corrente de falta. Percebem-se as características de não linearidade, assimetria, intermitência, *shoulder* e *buildup*, as quais correspondem às peculiaridades de uma corrente de FAI.

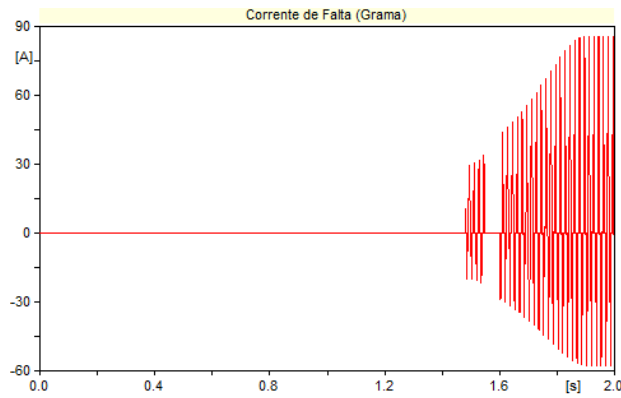
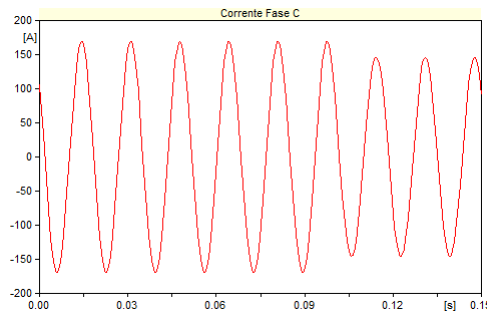


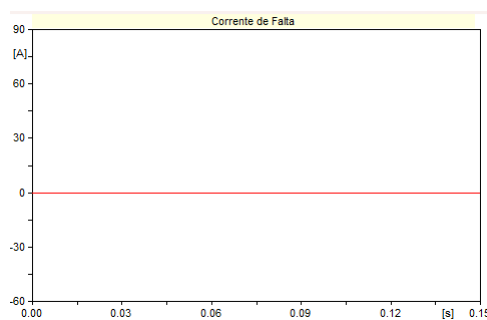
Figura 5.6: Corrente de Falta. Superfície: Grama.

Analisando a corrente do alimentador na fase C depois da falta e a corrente de falta, observa-se que:

- Em $t = 0,1$ s, conforme a Figura 5.7, ocorre o rompimento do condutor. A Chave 1 se abre, desconectando uma fração da carga conectada a Fase C. A corrente na fase reduz, em valor de pico, de 168 para 146 A. O ramo de falta ainda não é conectado a Fase C, logo a corrente de falta é igual a 0 A.



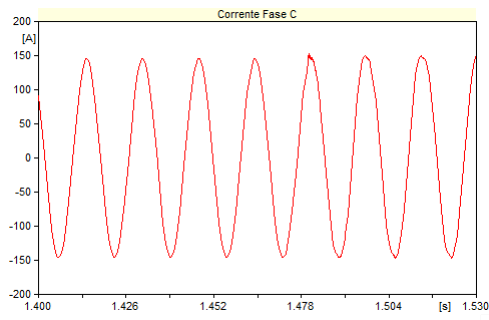
(a) Corrente na Fase C



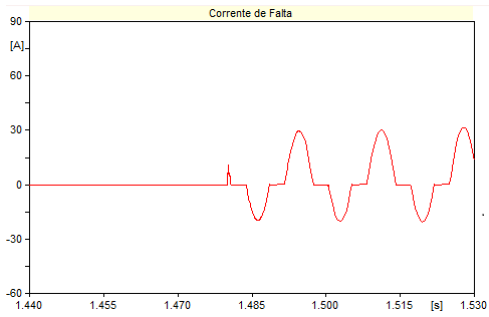
(b) Corrente de Falta

Figura 5.7: Instante de rompimento do condutor.

- Em $t = 1,48$ s, conforme a Figura 5.9, o ramo de falta é conectado à Fase C visto que a Chave 2 se fecha. Na corrente de falta, percebe-se a assimetria no formato de onda. O semiciclo positivo é de 29,5 A e de -20 A no semiciclo negativo.



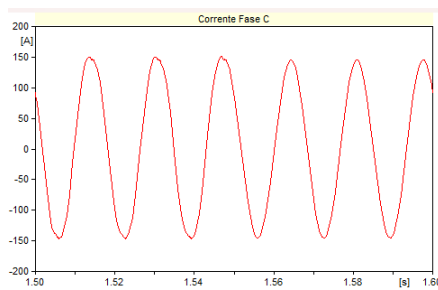
(a) Corrente na Fase C



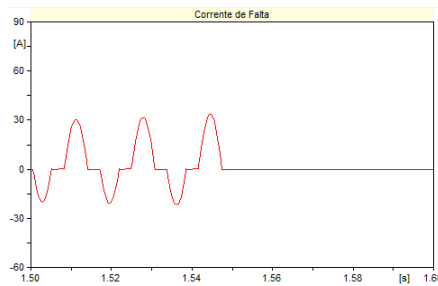
(b) Corrente de Falta

Figura 5.8: Instante de conexão do ramo de falta.

- Em $t = 1,547$ s, conforme a Figura 5.9, ocorre uma intermitência na corrente de falta. A Chave 2 reabre, a corrente de falta se anula e a fase C volta a alimentar somente as cargas conectadas à montante da falta.



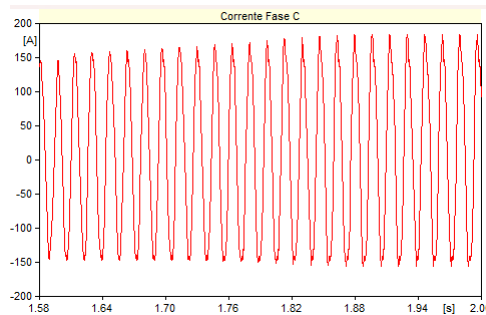
(a) Corrente na Fase C



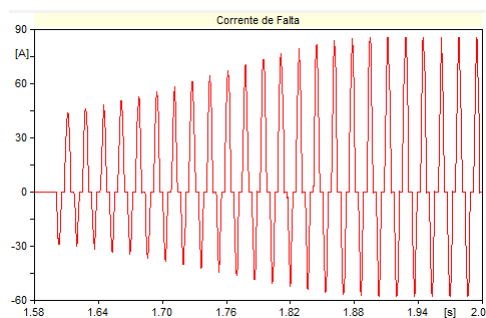
(b) Corrente de Falta

Figura 5.9: Instante de intermitência.

- Em $t = 1,601$ s, conforme a Figura 5.10, ocorre a reignição do arco elétrico. A Chave 2 fecha novamente e a falta volta a ser alimentada pela Fase C. Percebe-se que a impedância de falta cai à medida que o condutor estabelece um contato mais firme com o solo, provocando o *buildup*. A partir de $t = 1,9$ s, ocorre o fenômeno de *shoulder* e assume-se que a falta está em regime permanente. A corrente de falta é igual a 85 A no semiciclo positivo ($I_{FAI} < 90$ A) e de -56 A no semiciclo negativo.



(a) Corrente na Fase C



(b) Corrente de Falta

Figura 5.10: Instante de reconexão do ramo de falta.

5.3.2 Superfície 2: Asfalto Molhado

A Figura 5.11 ilustra a curva de corrente no alimentador das fases A, B e C. É perceptível uma variação na corrente do alimentador da fase defeituosa C.

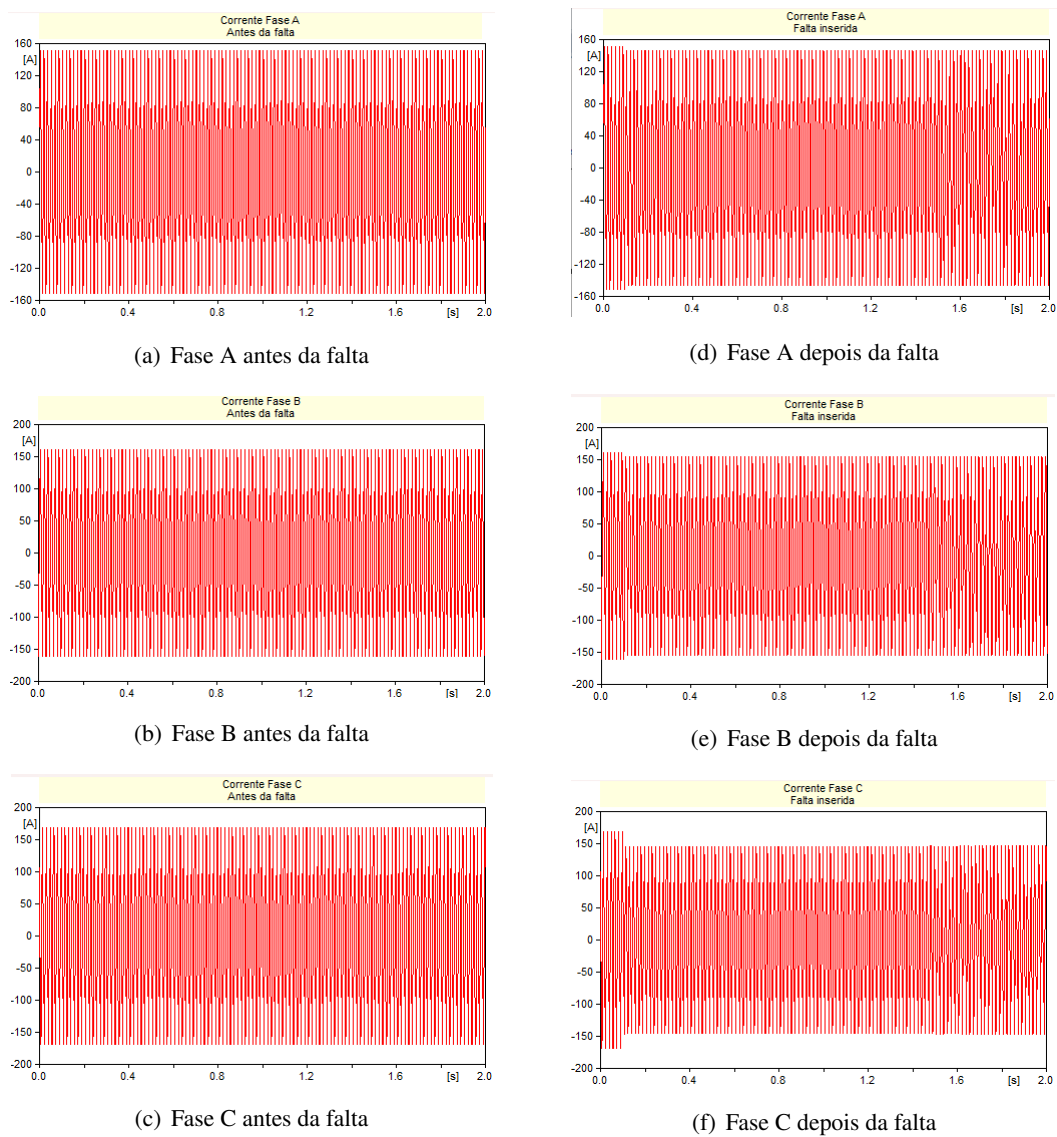


Figura 5.11: Corrente do alimentador antes e depois da falta.

Abaixo, segue a Figura 5.12 que ilustra a curva de corrente de falta. Percebem-se as características de não linearidade, assimetria, intermitência, *shoulder* e *buildup*, as quais correspondem às peculiaridades de uma corrente de FAI.

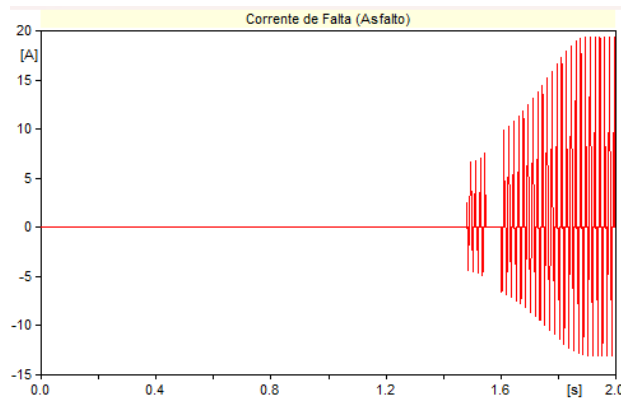
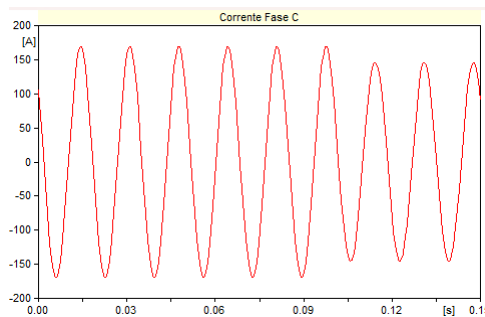


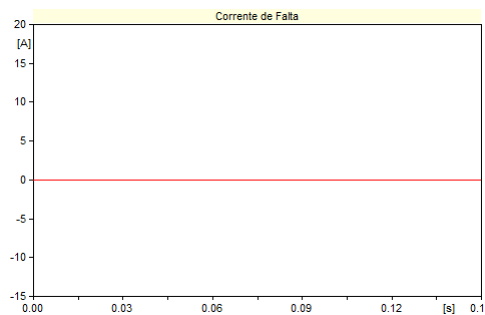
Figura 5.12: Corrente de Falta. Superfície: Asfalto.

Analisando a corrente do alimentador na fase C depois da falta e a corrente de falta, observa-se que:

- Em $t = 0,1$ s, conforme a Figura 5.13, ocorre o rompimento do condutor. A Chave 1 se abre, desconectando uma fração da carga conectada a Fase C. A corrente de fase diminui de 168 para 146 A. O ramo de falta ainda não é conectado a Fase C, logo a corrente de falta é igual a 0 A.



(a) Corrente na Fase C

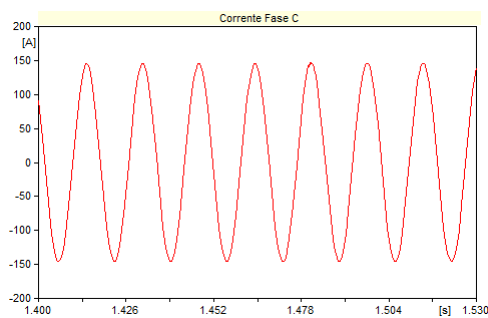


(b) Corrente de Falta

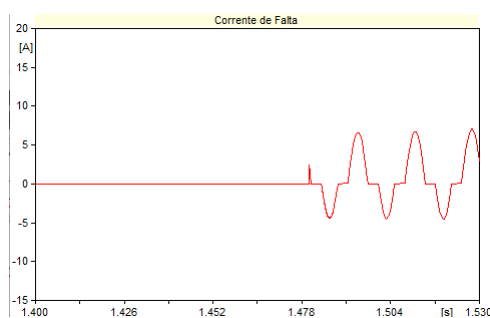
Figura 5.13: Instante de rompimento do condutor.

- Em $t = 1,48$ s, conforme a Figura 5.15, o ramo de falta é conectado à Fase C visto que a Chave 2 se fecha. Na corrente de falta, percebe-se a assimetria no formato de onda. Na

corrente de falta, percebe-se a assimetria no formato de onda. O semiciclo positivo é de 6,6 A e de -4,5 A no semiciclo negativo.



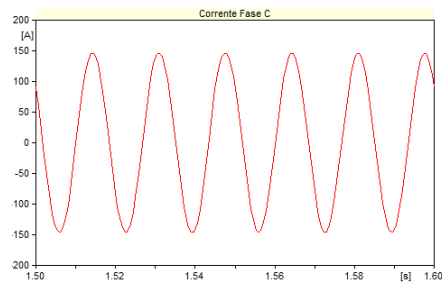
(a) Corrente na Fase C



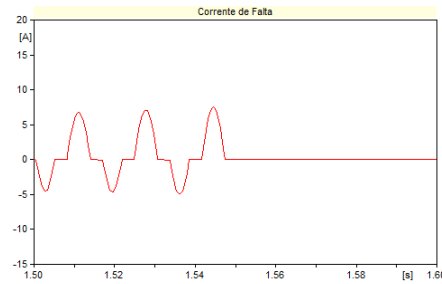
(b) Corrente de Falta

Figura 5.14: Instante de conexão do ramo de falta.

- Em $t = 1,547$ s, conforme a Figura 5.15, ocorre uma intermitência na corrente de falta. A Chave 2 reabre, a corrente de falta se anula e a fase C volta a alimentar somente as cargas conectadas à montante da falta.



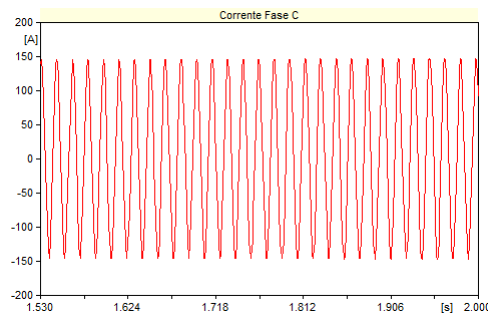
(a) Corrente na Fase C



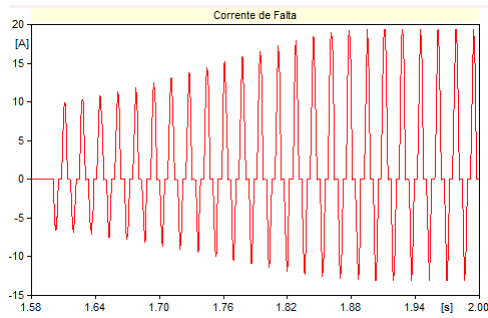
(b) Corrente de Falta

Figura 5.15: Instante de intermitência

- Em $t = 1,601$ s, conforme a Figura 5.16, ocorre a reignição do arco elétrico. A Chave 2 fecha novamente e a falta volta a ser alimentada pela Fase C. Percebe-se que a impedância de falta cai à medida que o condutor estabelece um contato mais firme com o solo, provocando o *buildup*. A partir de $t = 1,9$ s, ocorre o fenômeno de *shoulder* e assume-se que a falta está em regime permanente. A corrente de falta é igual a 19,3 A no semiciclo positivo ($I_{FAI} < 20$ A) e de -13 A no semiciclo negativo.



(a) Corrente na Fase C



(b) Corrente de Falta

Figura 5.16: Instante de reconexão do ramo de falta.

5.4 IMPLEMENTAÇÃO E DESEMPENHO DO ALGORITMO DE DETECÇÃO EM MATLAB

Utilizou-se a linguagem de programação MATLAB a fim de implementar o algoritmo de detecção de FAIs proposto por **Hou (2007)**. A descrição do método presente na Figura 3.1 em código permitiu a reamostragem, manipulação de dados, cálculo das quantidades úteis e seleção das variáveis a serem plotadas, com o intuito de simular e analisar o desempenho do algoritmo em diferentes cenários.

5.4.1 Implementação em MATLAB

A implementação do algoritmo foi realizada por meio de funções, as quais são descritas a seguir. O código encontra-se disponível no Apêndice B.

1. *fcn_LerArquivoPL4*

O arquivo '.acp', correspondente ao arquivo de projeto no ATPDraw, contém informações sobre o desenho do sistema elétrico e as configurações e parâmetros dos elementos do modelo. Após a compilação, é gerado pelo ATPDraw um arquivo '.pl4', o qual permite que os dados obtidos nas simulações do ATP sejam utilizados externamente.

Primeiramente, para o armazenamento dos dados de simulação, foi escrita uma função que

realiza a leitura dos dados do arquivo '.pl4' exportado pelo ATPDraw.

Na função *fcn_LerArquivoPLA*, foi selecionado a variável *CASO*, que corresponde ao arquivo '.acp' correspondente. As variáveis armazenadas são:

- (a) *LT.ia_SE_ATP*, *LT.ib_SE_ATP* e *LT.ic_SE_ATP*, que correspondem às correntes do alimentador nas fases A, B e C, respectivamente.
- (b) *Dados.t_ATP*, que corresponde ao vetor de tempo.

Dado que o tempo de simulação é de $T_{max} = 2$ s, e o passo de tempo é de $\delta T = 1.10^{-5}$ s, o tamanho dos vetores é:

$$length(Dados.t_ATP) = \frac{2}{1.10^{-5}} + 1 = 200001 \quad (5.7)$$

2. *fcn_ReamostraSinais* A função realiza a reamostragem de sinais provenientes do ATP, através da aplicação de um filtro anti-aliasing. A reamostragem é feita para adequar os sinais ao número desejado de amostras por ciclo de 60 Hz. Foi escolhido o número *Dados.N* de 32 amostras por ciclo. São armazenadas as variáveis:

- (a) *LT.ia_SE*, *LT.ib_SE* e *LT.ic_SE*, que correspondem às correntes do alimentador nas fases A, B e C, respectivamente.
- (b) *Dados.t*, que corresponde ao vetor de tempo.

O tamanho dos vetores é:

$$length(Dados.t) = 2 * 32 * 60 = 3840 \quad (5.8)$$

3. *fcn_SEL_SDI(LT,Dados)* A função calcula correntes diferenciais (DIa, DIb e DIc) entre pontos no mesmo ciclo e, em seguida, realiza uma soma acumulada dessas correntes em intervalos específicos, armazenando os resultados em SDIa, SDIb e SDIc. O laço de repetição começa no terceiro ciclo ($3 * Dados.N + 1$) e percorre até o final dos pontos (*Dados.NumPontos*).
4. *fcn_SEL_IIR(LT,Dados)* A função, implementada apenas para a fase C, que corresponde à fase defeituosa escolhida, visa calcular o vetor de referência *LT.SDIc_REF*, conforme apresentado no Capítulo 3. A constante associada ao ajuste adaptativo não é calculada dinamicamente, como no bloco "Ajuste Adaptativo" do algoritmo de Hou (2007), haja vista que não foram consideradas a presença de cargas ruidosas. Ademais, não foi implementada a entrada de bloqueio do cálculo, ao assumir a inexistência de outro distúrbio na rede.
5. *fcn_SEL_TM(LT,Dados)* Essa função calcula o desvio entre o vetor de corrente diferencial (*LT.SDIc*) e o vetor de referência (*LT.SDIc_REF*). Em seguida, ela verifica se o desvio é maior que um limite específico (*Dados.d*). Se o desvio excede esse limite, a função contabiliza esse evento, armazena informações associadas ao desvio e ajusta a contagem total

(Dados.n). Nesse caso, Dados.n é incrementado, e as informações associadas ao desvio (tempo e razão de desvio) são armazenadas nos vetores LT.tdc e LT.rdc. O último elemento de *tdc_non* é atribuído a *Dados.told* se *tdc_non* não estiver vazio. Caso contrário, *Dados.told* é atribuído como 0.

6. *fcn_SEL_DL(LT,Dados)* Essa função corresponde ao bloco de lógica de decisão que determina a existência ou não de uma Falta de Alta Impedância (FAI) com base em condições específicas. Um loop *for* calcula a diferença de tempo (*calcdt*) entre *Dados.told* e cada valor em *LT.tdc_non*. Se o bloco anterior identificou algum desvio que excedeu o limite, é executada a classificação dos pontos a serem plotados no gráfico, podendo ser de três regiões distintas: sem contagem, alarme e falta, sendo essa última a detecção da falta de alta impedância.

5.4.2 Resultados e Desempenho do Algoritmo

A seguir, são analisadas os sinais, as variáveis e as respostas do algoritmo de **Hou (2007)** para três casos: alimentador operando em condições normais, falta de alta impedância ocorrida em grama molhada e falta de alta impedância em asfalto molhado.

5.4.2.1 Alimentador Operando em Condições Normais

Para o alimentador operando em condições normais, isto é, sem o defeito aplicado, o algoritmo apresenta as respostas a seguir:

- i) A Figura 5.17 ilustra que a quantidade *SDIc* permaneceu próxima à referência *SDIc_REF* dentro de uma margem pré-definida.

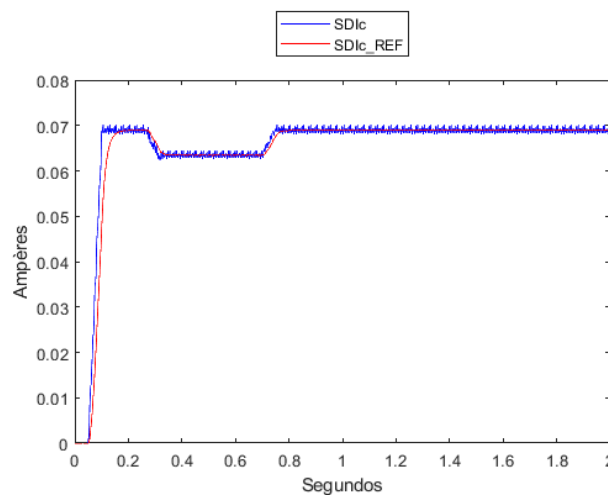


Figura 5.17: Quantidade SDI e referência. Caso sem falta.

- ii) O contador *Dados.n*, número de vezes que SDI se afasta do limite da referência mais a

margem, permaneceu nulo, ou seja, não registrou nenhuma ocorrência.

5.4.2.2 Falta Aplicada. Superfície 1: Grama Molhada

Para o alimentador com a FAI aplicada, para a superfície 1, o algoritmo apresenta as respostas a seguir:

i) A Figura 5.18 ilustra que a quantidade $SDIc$ afastou-se da referência $SDIc_REF$.

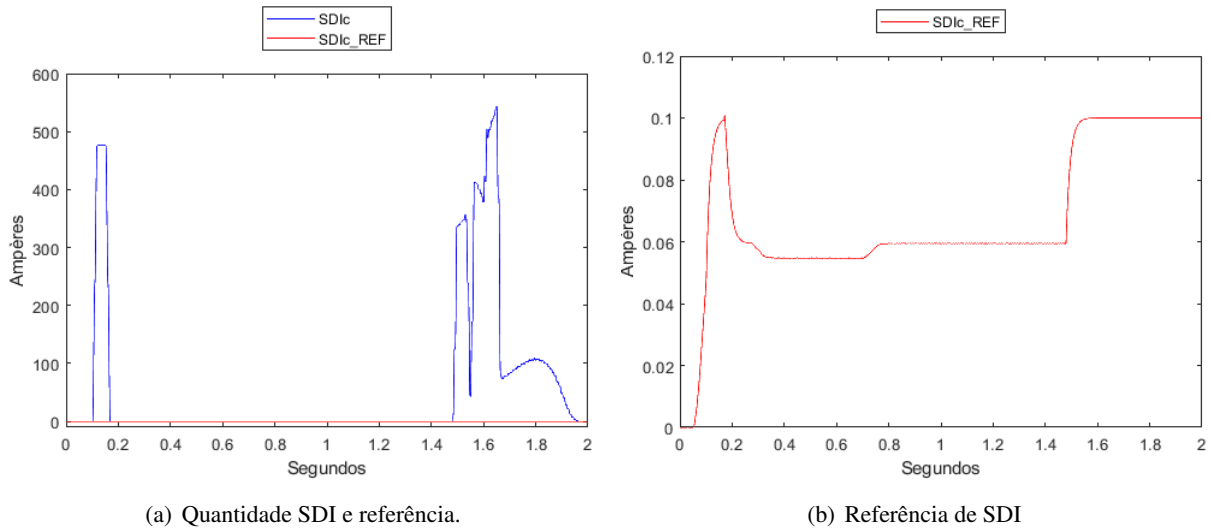


Figura 5.18: Quantidade SDI e referência. Superfície 1.

ii) O contador $Dados.n$, número de vezes que SDI se afasta do limite da referência mais a margem, registrou 1132 ocorrências.

iii) A Figura 5.19 ilustra que houve a detecção de FAIs com êxito, haja vista que houveram pontos rd,dt que caíram na região 3.

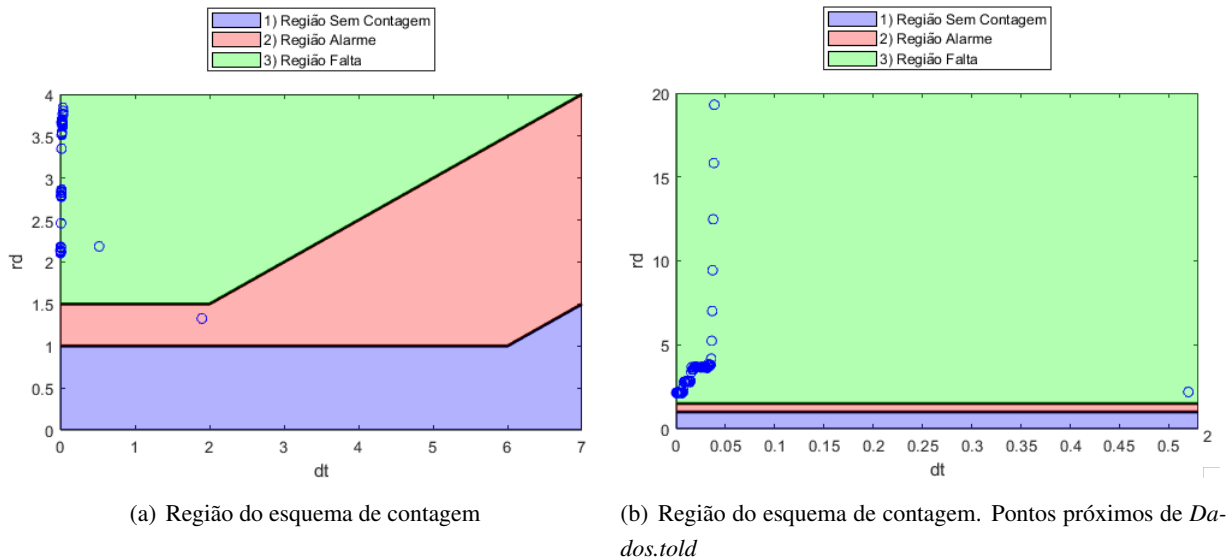


Figura 5.19: Regiões de Contagem: Lógica de Decisão. Superfície 1.

iv) Os pares rd, dt caíram em cada região com a seguinte frequência, expressa na Tabela 5.14:

Tabela 5.13: Tabela de Região e Frequência. Superfície 1.

| Região | Frequência |
|--------|------------|
| 1 | 0 |
| 2 | 1 |
| 3 | 999 |

Percebe-se que a frequência total é menor do que o contador *Dados.n*. Isso ocorre haja vista que um esquema de contagem de faltas determina se incrementar o contador de faltas *Dados.TF* ou não. O único caso de alarme (Região 2) ocorreu no par $\{dt, rd\} = \{1,8979, 1,3268\}$. Como *Dados.told* = 1,9995,

$$t = 1,9995 - 1,8979 = 0,1 \text{ s} \quad (5.9)$$

Percebe-se que o alarme corresponde justamente ao instante em que houve o rompimento do condutor.

O primeiro caso de falta (Região 3) ocorreu no par $\{dt, rd\} = \{0,5198, 2,1863\}$. Como *Dados.told* = 1,9995,

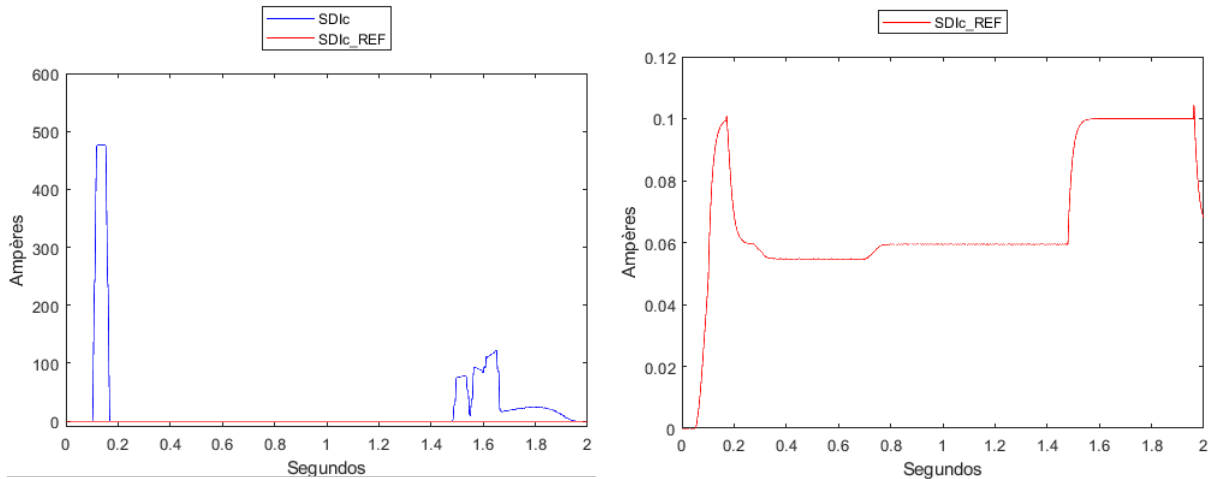
$$t = 1,9995 - 0,5198 = 1,48 \text{ s} \quad (5.10)$$

Percebe-se que a detecção da falta corresponde justamente ao instante em que houve a conexão do ramo da falta.

5.4.2.3 Falta Aplicada. Superfície 2: Asfalto Molhado

Para o alimentador com a FAI aplicada, para a superfície 2, o algoritmo apresenta as respostas a seguir:

i) A Figura 5.20 ilustra que a quantidade $SDIc$ afastou-se da referência $SDIc_REF$.



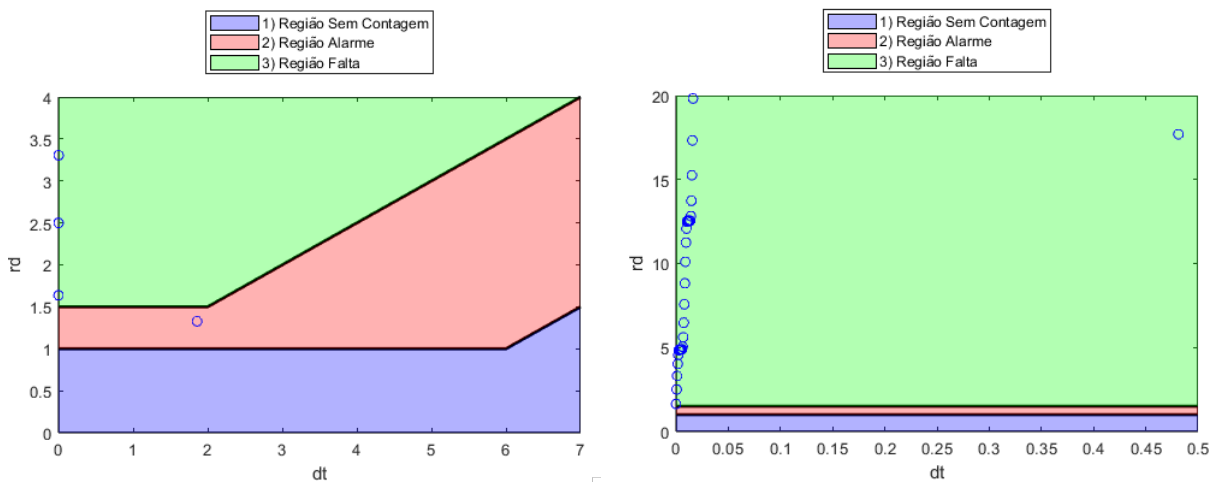
(a) Quantidade SDI e referência.

(b) Referência de SDI

Figura 5.20: Quantidade SDI e referência. Superfície 2.

ii) O contador $Dados.n$, número de vezes que SDI se afasta do limite da referência mais a margem, registrou 1058 ocorrências.

iii) A Figura 5.21 ilustra que houve a detecção de FAIs com êxito, haja vista que houveram pontos rd,dt que caíram na região 3.



(a) Região do esquema de contagem

(b) Região do esquema de contagem. Pontos próximos de $Dados.told$

Figura 5.21: Regiões de Contagem: Lógica de Decisão. Superfície 2.

iv) Os pares rd,dt caíram em cada região com a seguinte frequência, expressa na Tabela 5.14:

Tabela 5.14: Tabela de Região e Frequência. Superfície 2.

| Região | Frequência |
|--------|------------|
| 1 | 0 |
| 2 | 1 |
| 3 | 925 |

Percebe-se que a frequência total é menor do que o contador Dados.n. Isso ocorre haja vista que um esquema de contagem determina se contar ou não.

O único caso de alarme (Região 2) ocorreu no par {dt, rd} = {1,8599, 1,3268}. Como $Dados.told = 1,9615$,

$$t = 1,9615 - 1,8599 = 0,1 \text{ s} \quad (5.11)$$

Percebe-se que o alarme corresponde justamente ao instante em que houve o rompimento do condutor.

O primeiro caso de falta (Região 3) ocorreu no par {dt, rd} = {0,4812, 17,6941}. Como $Dados.told = 1,9615$,

$$t = 1,9615 - 0,4812 = 1,48 \text{ s} \quad (5.12)$$

Percebe-se que a detecção da falta corresponde justamente ao instante em que houve a conexão do ramo da falta.

Apesar de experimentos como o de **Santos (2011)** revelarem a atuação da proteção apenas para o caso da grama molhada, com maior corrente de FAI, o algoritmo de **Hou (2007)** mostrou-se capaz de detectar também para o caso do asfalto molhado.

Conclui-se que o algoritmo se mostrou com bom desempenho, ao diferenciar pela quantidade SDI um alimentador em condições normais de operação de um caso sob falta de alta impedância. Demonstrou, portanto, capacidades além dos relés de sobrecorrente.

CONCLUSÃO E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Neste estudo, foram abordadas as características essenciais, modelos e métodos de detecção de faltas de alta impedância. Foi introduzido um algoritmo de detecção que é fácil de entender e econômico de implementar. O algoritmo utiliza uma quantidade SDI que revela assinaturas de FAIs, mantendo-se geralmente livre de contaminação por cargas de distribuição. Por meio de um processo de ajuste adaptativo, o algoritmo pode "aprender" o perfil de ruído ambiente dos alimentadores de distribuição e, assim, aumentar a segurança das detecções de falhas. Um filtro IIR fornece uma referência estável para SDI durante condições de comutação e falha para a detecção de Falta de Alta Impedância (FAI). É evidente que os esforços direcionados à identificação e mitigação da FAI desempenham um papel crucial na preservação da segurança pública, prevenindo acidentes fatais e incêndios. Além disso, são de grande importância para as concessionárias de energia, uma vez que ajudam a evitar interrupções substanciais no fornecimento de energia, que, em última instância, poderiam levar à revogação da concessão para operar como distribuidora. A realização de manutenções preventivas, o recondutoramento da rede primária são estratégias adotadas pelas distribuidoras para minimizar os riscos de ocorrência de FAI. No entanto, identificar a FAI não é uma tarefa simples, pois os relés convencionais baseados em sobrecorrente não são sensíveis às correntes associadas à FAI.

Com o intuito de realizar uma avaliação do algoritmo de detecção de **Hou (2007)**, simulações de FAI foram realizadas no alimentador aéreo 1004 modelado, com o mote de detectar a perturbação no sistema com êxito sob condições distintas. Foram apresentadas as implementações para a modelagem de faltas de alta impedância e a descrição do algoritmo. Para isto, foi utilizado o software ATP, para modelagem do alimentador de distribuição, e do MATLAB como linguagem de programação.

O modelo de FAI, baseado no modelo de **Emanuel et al. (1990a)**, atendeu plenamente às expectativas estabelecidas, uma vez que representa de maneira realista as características da corrente de falta. Ele exibe características que estão em conformidade com os padrões descritos na literatura, além de ser de fácil parametrização, destacando-se pela sua simplicidade.

O algoritmo de detecção de FAI, o qual utiliza uma quantidade SDI que revela assinaturas de FAIs, foi capaz de detectar o defeito na rede simulada para diferentes superfícies e diferenciá-lo das condições normais do alimentador. Demonstrou capacidades além dos relés de sobrecorrente tradicionais para detectar FAIs, em conformidade com resultados obtidos por dados do mundo real, que, mesmo em meio a cargas ruidosas, confirmaram a segurança do algoritmo.

Diante do exposto, indica-se como sugestão para trabalhos futuros:

- Elaborar um modelo de FAI sem rompimento do condutor, expresso pelo contato com árvore;
- Testar o algoritmo em sistemas de distribuição rurais caracterizados pela presença de mini-geração distribuída;
- Analisar a resposta do algoritmo, quando ocorre, concomitantemente, uma falta de alta impedância e outros fenômenos como chaveamento de bancos de capacitores ou ocorrência de faltas de baixa impedância;
- Implementar o ajuste adaptativo para a melhoria da precisão do algoritmo em um alimentador sob condições de cargas ruidosas;
- Utilizar um algoritmo que lance mão de métodos de inteligência artificial para a lógica de decisão;
- Testar outros algoritmos de detecção de FAI, que utilizam métodos reportados na literatura baseados no monitoramento da tensão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANEEL. Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional - prodist, módulo 8 - qualidade da energia elétrica. Norma técnica, ANEEL, 2021.
- M. Aucoin and B. D. Russell. Detection of distribution high impedance faults using burst noise signals near 60 hz. *IEEE Power Engineering Review*, PER-7(4):40–41, April 1987. ISSN 0272-1724.
- H. Calhoun, M. T. Bishop, C. H. Eichler, and R. E. Lee. Development and testing of an electro-mechanical relay to detect fallen distribution conductors. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101(6):1643–1650, June 1982. ISSN 0018-9510.
- CEB, NTD 2.06. Redes e linhas de distribuição aéreas primárias compactas - rldc padrões básicos de montagem para 13,8/34,5 kv. Norma Técnica NTD – 2.06, CEB - Companhia Energética de Brasília, Brasília, DF, 2011.
- CEB, NTD 2.12. Padrão de construção de redes de distribuição aérea - empreendimentos habitacionais de interesse social. Norma Técnica NTD – 2.12, CEB - Companhia Energética de Brasília, Brasília, DF, 2011.
- D. T. W. Chan and X. Yibin. A novel technique for high impedance fault identification. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 13(3), July 1998. doi: 10.1109/61.677660.
- A. Emanuel, D. Cyganski, J. Orr, S. Shiller, and E. Gulachenski. 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*, 5(2):676–686, April 1990a. doi: 10.1109/61.53070. URL <https://doi.org/10.1109/61.53070>.
- A. Emanuel, D. Cyganski, J. Orr, S. Shiller, and E. Gulachenski. 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*, 5(2):676–686, April 1990b.
- J. A. Filho and M. P. Pereira. *ATP – Alternative Transients Program: Curso Básico Sobre a Utilização do ATP*. CLAU: Comitê Latino Americano de Usuários do EMTP/ATP, 1996.
- Daqing Hou. Detection of high-impedance faults in power distribution systems. *Presented at the 6th Annual Clemson University Power Systems Conference*, March 13–16 2007. doi: TP6248-01. Originally presented at the 33rd Annual Western Protective Relay Conference, October 2006.
- C.-L. Huang, H.-Y. Chu, and M.-T. Chen. Algorithm comparison for high impedance fault detection based on staged fault test. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3(4):1427–1435, Oct 1988. ISSN 0885-8977. doi: 10.1109/61.19350.

- L. U. Iurinic. *Localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia: uma abordagem baseada na estimação de parâmetros associados a modelos no domínio do tempo*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.
- D. I. Jeerings and J. R. Linders. Ground resistance-revisited. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(2):949–956, April 1989. ISSN 0885-8977.
- C. Kim and B. D. Russell. Harmonic behavior during arcing faults on power distribution feeders. *Electric Power Systems Research*, 14(3):219–225, Jun 1988. doi: 10.1016/0378-7796(88)90023-6.
- C. V. S. Malagodi. Sistema de proteção para faltas de alta impedância. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.
- P. M. Miguel. *Introdução à simulação de relés de proteção usando a linguagem “Models” do ATP*. Ciência Moderna, Rio de Janeiro, 2011.
- R. M. Nakagomi. Proposição de um sistema de faltas de alta impedância em redes de distribuição. Master’s thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Dissertação (Mestrado).
- S. R. Nam, J. K. Park, Y. C. Kang, and T. H. Kim. A modeling method of a high impedance fault in a distribution system using two series time-varying resistances in emtp. In *2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262)*, volume 2, pages 1175–1180 vol.2, S.l.: s.n., 2001a. IEEE. doi: 10.1109/PESS.2001.970477.
- S. R. Nam, J. K. Park, Y. C. Kang, and T. H. Kim. A modeling method of a high impedance fault in a distribution system using two series time-varying resistances in emtp. In *2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262)*. IEEE, 2001b.
- Dilzair Alvimar de Oliveira Junior. Faltas de alta impedância: Detecção e localização de rompimento de condutores em circuito primário de redes aéreas de distribuição baseado em desequilíbrio de tensão. Master’s thesis, Nome da Universidade, Belo Horizonte, MG, Maio 2006.
- PSRC Working Group D15. High impedance fault detection technology. Technical report, PSRC, March 1 1996.
- W. C. Santos. Uma revisão de modelos clássicos de faltas de alta impedância para efeito de melhoramento. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.
- Wellinsílvio Costa dos Santos. *Identificação de Faltas de Alta Impedância em Sistemas de Distribuição*. PhD thesis, Universidade de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, 2016. ilustrações coloridas.
- M. Sedighzadeh, A. Rezazadeh, and N. I. Elkaly. Approaches in high impedance fault detection - a chronological review. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 10(3):114–128, 2010.

P. R. Silva. Técnica alternativa para detecção de faltas de alta impedância. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 1992.

W. Stevenson. *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*. McGraw Hill, 2016.

Luiz Henrique Pessoa da Costa Trondoli. *Detecção de Faltas de Alta Impedância do Tipo Fase-Terra em Sistemas de Distribuição: Uma Abordagem Baseada em sua Progressão no Domínio do Tempo e da Frequência*. PhD thesis, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023. Orientador: José Carlos de Melo Vieira Júnior.

```

1
2 MODEL exmp          -- NB! 6 character name limit
3
4 DATA n -- number of phases
5 ng {dflt: n*(n+1)/2} -- number of conductances on each side
6 INPUT v[1..n] -- voltage(t) at each left node
7 v0[1..n] -- voltage(t=0) at each left node
8 i0[1..n] -- current(t=0) into each left node
9 VAR i[1..n] -- current(t) into each left node (plotting)
10 is[1..n] -- Norton source(t+timestep) at each left node
11 g[1..ng] -- condutance(t+timestep) at each left node
12 flag -- set to 1 whenever conductance value is modified
13 OUTPUT i[1..n],is[1..n],g[1..ng],flag
14 DATA L1 --[H]
15 VAR st
16 L --[H]
17 INIT
18 st := 3/(2*timestep)
19 L := L1
20 g := 1/(st*L)
21 ENDINIT
22 EXEC
23 IF t=0 THEN
24   flag := 1
25   i := i0
26   is := -((4/3)*i0-(1/3)*0)
27 ELSE
28   flag := 0
29   i := g*v-is
30   is := -((4/3)*i-(1/3)*prevval(i))
31 ENDIF
32 ENDEXEC
33 ENDMODEL

```

Listing A.1: Código para implementação dos blocos *Norton Type-94* do ATPDraw, que modelam o indutor (Jurinic, 2016).


```
1 function [LT, Dados] = fcn_LerArquivoPL4(Dados)
2
3     DIRETORIO = 'ATPDRAW';
4     % CASO = 'neo_1004_vsfai';
5     CASO = 'neo_1004_vcfai';
6
7     cd(DIRETORIO);
8     system(char(strcat('pl42mat.exe', {' '}, CASO, '.pl4')));
9     load(strcat(CASO, '.mat'));
10    delete(char(strcat(CASO, '.mat')));
11    cd('..');
12
13    Dados.t_ATP = t;
14
15    % LT.ia_SE_ATP = iX0255aX0002a;
16    % LT.ib_SE_ATP = iX0255bX0002b;
17    % LT.ic_SE_ATP = iX0255cX0002c;
18    LT.ia_SE_ATP = iX0260aX0003a;
19    LT.ib_SE_ATP = iX0260bX0003b;
20    LT.ic_SE_ATP = iX0260cX0003c;
21
22 end
```

Listing B.1: Código MATLAB para a função fcn_LerArquivoPL4

```

1 function [LT, Dados] = fcn_ReamostraSinais(LT, Dados)
2
3     fc = 480;
4     ordem = 3;
5
6     LT.ia_SE = fcn_Sampling(LT.ia_SE_ATP, Dados.dt_ATP, Dados.N, fc, ...
7         ordem);
8     LT.ib_SE = fcn_Sampling(LT.ib_SE_ATP, Dados.dt_ATP, Dados.N, fc, ...
9         ordem);
10    LT.ic_SE = fcn_Sampling(LT.ic_SE_ATP, Dados.dt_ATP, Dados.N, fc, ...
11        ordem);
12
13
14    Dados.t = (0:length(LT.ia_SE)-1) * Dados.dt;
15    Dados.NumPontos = length(Dados.t);
16 end
17
18 function sigd = fcn_Sampling(sig, dt, N, fc, ordem)
19     if nargin == 3
20         fc = 480;
21         ordem = 3;
22     end
23
24     [z, p, k] = butter(ordem, fc, 'low', 's');
25     [num, den] = zp2tf(z, p, k);
26     [numwp, denwp] = lp2lp(num, den, 2*pi*fc);
27     h = tf(numwp, denwp);
28
29     t = (0:length(sig)-1) * dt;
30     sigf = lsim(h, sig, t);
31     f = 60;
32     fs = N * f;
33     dtd = 1/fs;
34     td = 0;
35     n = 1;
36
37     sigd(1) = sigf(1);
38     for k = 2:length(sigf)
39         if (t(k) + dt) > (td + dtd)
40             td = td + dtd;
41             a = (sigf(k) - sigf(k-1)) / dt;
42             sigd(n) = a * (td - t(k)) + sigf(k);
43             n = n + 1;
44         end
45     end
46 end

```

Listing B.2: Código MATLAB para a função `fcn_ReamostraSinais`

```

1 function [LT, Dados] = fcn_SEL_SDI(LT, Dados)
2
3     % Cálculo das correntes diferenciais
4     for k = 3*Dados.N + 1:Dados.NumPontos % Começa do terceiro ciclo
5         LT.DIa(k) = abs(LT.ia_SE(k) - LT.ia_SE(k - Dados.N));
6         LT.DIb(k) = abs(LT.ib_SE(k) - LT.ib_SE(k - Dados.N));
7         LT.DIc(k) = abs(LT.ic_SE(k) - LT.ic_SE(k - Dados.N));
8     end
9
10    LT.SDIa = zeros(size(LT.ia_SE)); % Zera os somadores
11    LT.SDIb = zeros(size(LT.ib_SE));
12    LT.SDIc = zeros(size(LT.ic_SE));
13    a = 96; % Número de amostras desejadas para a soma
14    for k = 3*Dados.N + 1:Dados.NumPontos
15        for n = 0:a % Intervalo do somatório
16            LT.SDIa(k) = LT.SDIa(k) + LT.DIa(k - n); % Acumulador
17            LT.SDIb(k) = LT.SDIb(k) + LT.DIb(k - n);
18            LT.SDIc(k) = LT.SDIc(k) + LT.DIc(k - n);
19        end
20    end
21
22 end

```

Listing B.3: Código MATLAB para a função fcn_SEL_SDI

```

1 function [LT, Dados] = fcn_SEL_IIR(LT, Dados) % Implementado para a ...
   Fase C
2   %-----%
3   %       Argumentos de Entrada       %
4   Dados.TC = 0.5; % Constante de tempo utilizada (s)
5   Dados.s = 2; % Qualquer inteiro maior do que 1 - Constante do ...
      comparador
6   Dados.PR = Dados.f; % 60 Hz para sistemas de potência
7   Dados.d = 5e-2; % Constante associada ao ajuste adaptativo
8   Dados.f = Dados.s; % Constante associada ao SW2.
9   %-----%
10
11  Dados.alpha = exp(-1 / (Dados.PR * Dados.TC)); % Cálculo de alpha
12
13  LT.SDIc_REF = zeros(size(LT.SDIc)); % Zera o vetor de referência
14  % Cálculo do SDIc_REF
15  for k = 3 * Dados.N + 1:Dados.NumPontos
16      if LT.SDIc(k) < Dados.s * Dados.d + LT.SDIc_REF(k - 1)
17          LT.SDIc_REF(k) = (1 - Dados.alpha) * LT.SDIc(k) + ...
              Dados.alpha * LT.SDIc_REF(k - 1);
18      else
19          LT.SDIc_REF(k) = (1 - Dados.alpha) * Dados.f * Dados.d + ...
              Dados.alpha * LT.SDIc_REF(k - 1);
20      end
21  end
22
23  figure;
24  plot(Dados.t, LT.SDIc, 'b', Dados.t, LT.SDIc_REF, 'r');
25  legend({'SDIc', 'SDIc\_REF'}, 'Location', 'northoutside');
26  ylabel('Ampères');
27  xlabel('Segundos');
28  ylim([-10 600])
29  figure;
30  plot(Dados.t, LT.SDIc_REF, 'r');
31  legend({'SDIc\_REF'}, 'Location', 'northoutside');
32  % Configure os rótulos e o título do gráfico
33  ylabel('Ampères');
34  xlabel('Segundos');
35  end

```

Listing B.4: Código MATLAB para a função fcn_SEL_IIR

```

1 function [LT, Dados] = fcn_SEL_TM(LT, Dados)
2     %-----%
3     %       Argumentos de Entrada       %
4     Dados.TC = 0.5; % Constante de tempo utilizada (s)
5     Dados.s = 2; % Qualquer inteiro maior do que 1 - Constante do ...
        comparador
6     Dados.PR = Dados.f; % 60 Hz para sistemas de potência
7     Dados.d = 5e-2; % Constante associada ao ajuste adaptativo
8     %-----%
9
10    Dados.alpha = exp(-1 / (Dados.PR * Dados.TC)); % Cálculo de alpha
11
12    LT.dSDIc = zeros(size(LT.SDIc)); % Zera o vetor de desvio da ...
        referência
13    LT.tdc = zeros(size(LT.SDIc)); % Zera o vetor de tempo armazenado ...
        para desvio
14    LT.rdc = zeros(size(LT.SDIc)); % Zera o vetor de razão de desvio
15    Dados.n = 0; % Número de vezes que SDI se afasta do limite da ...
        referência mais a margem
16
17    % Cálculo do SDI_REF
18    for k = 3 * Dados.N + 1: Dados.NumPontos
19        LT.dSDIc(k) = abs(LT.SDIc(k) - LT.SDIc_REF(k)); % Calcula a ...
                diferença absoluta
20        if LT.dSDIc(k) > Dados.d
21            Dados.n = Dados.n + 1;
22            LT.tdc(k) = Dados.t(k);
23            LT.rdc(k) = LT.dSDIc(k) / Dados.d; % d ainda tratada como ...
                constante
24        end
25    end
26
27    LT.tdc_non = nonzeros(LT.tdc); % Retira os valores nulos
28    LT.rdc_non = nonzeros(LT.rdc); % Retira os valores nulos
29
30    % Correção para garantir que LT.tdc_non tem pelo menos um elemento ...
        antes de acessar o último elemento
31    if ~isempty(LT.tdc_non)
32        Dados.told = LT.tdc_non(end); % Último elemento de LT.tdc_non
33    else
34        Dados.told = 0;
35    end
36
37 end

```

Listing B.5: Código MATLAB para a função fcn_SEL_TM

```

1 function [LT, Dados] = fcn_SEL_DL(LT, Dados)
2 % Bloco Decision Logic determina a existência ou não de uma FAI
3     for k = 1:Dados.n
4         LT.calcdt(k) = Dados.told - LT.tdc_non(k);
5     end
6
7     if Dados.n
8         x = 0:0.1:7;
9         y_sem_contagem = zeros(size(x));
10        y_sem_contagem(x <= 6) = 1;
11        y_sem_contagem(x > 6) = 0.5 * (x(x > 6) - 6) + 1;
12
13        y_alarme = zeros(size(x));
14        y_alarme(x <= 2) = 1.5;
15        y_alarme(x > 2) = 0.5 * (x(x > 2) - 2) + 1.5;
16
17        y_falta = zeros(size(x));
18        y_falta(x >= 0 & x <= 7) = 4;
19
20        % Plote todas as regiões
21        figure; plot(x, y_sem_contagem, 'k', 'LineWidth', 2, ...
22                'HandleVisibility', 'off');
23        hold on; plot(x, y_alarme, 'k', 'LineWidth', 2, ...
24                'HandleVisibility', 'off');
25        % Preencher as regiões
26        fill([0 0 6 7 7], [0 1 1 1.5 0], 'b', 'FaceAlpha', 0.3, ...
27                'DisplayName', '1) Região Sem Contagem');
28        fill([0 0 2 7 7 6], [1 1.5 1.5 4 1.5 1], 'r', 'FaceAlpha', ...
29                0.3, 'DisplayName', '2) Região Alarme');
30        fill([0 0 7 2], [1.5 2000 2000 1.5], 'g', 'FaceAlpha', 0.3, ...
31                'DisplayName', '3) Região Falta');
32        legend({'1) Região Sem Contagem', '2) Região Alarme', '3) ...
33                Região Falta'}, 'Location', 'northoutside')

```

Listing B.6: Parte 1 do código MATLAB para a função fcn_SEL_DL

```

1     x_values = LT.calcdt;
2     y_values = LT.rdc_non;
3     x_labels = zeros(size(x_values));
4     Dados.TF = 0; Dados.TA = 0; Dados.TSC = 0; Dados.OI = 0; ...
        Dados.xold = 0; % Contadores e verificador de alarme
5
6     for i = 1:numel(x_values)
7         x = x_values(i);
8         y = y_values(i);
9
10        if x >= 0 && x <= 7
11            if y <= y_sem_contagem(round(x * 10) + 1)
12                fprintf('Ponto %d: x = %.4f, y = %.4f - "Sem ...
                    Contagem"\n', i, x, y);
13                Dados.TSC = Dados.TSC + 1; x_labels(i) = 1;
14            elseif y > y_alarme(round(x * 10) + 1)
15                if Dados.xold - x > 0.1
16                    Dados.TF = Dados.TF + 1;
17                    fprintf('Ponto %d: x = %.4f, y = %.4f - ...
                        "Falta"\n', i, x, y);
18                    x_labels(i) = 3;
19                end
20            else
21                fprintf('Ponto %d: x = %.4f, y = %.4f - ...
                    "Alarme"\n', i, x, y);
22                Dados.xold = x; Dados.TA = Dados.TA + 1; ...
                    x_labels(i) = 2;
23            end
24        else
25            fprintf('Ponto %d: x = %.4f, y = %.4f - "Fora de ...
                Contagem"\n', i, x, y);
26            Dados.OI = Dados.OI + 1; x_labels(i) = 4;
27        end
28    end
29
30    Dados.Total = Dados.TSC + Dados.TA + Dados.TF;
31    indices_validos = find(x_labels ~= 4 & x_labels ~= 0);
32    % Plot os pontos apenas para pontos classificados como "Sem ...
        Contagem", "Alarme" e "Falta"
33    scatter(x_values(indices_validos), y_values(indices_validos), ...
        'b', 'HandleVisibility', 'off');
34    xlabel('dt'); ylabel('rd');
35 end
36 end

```

Listing B.7: Parte 2 do código MATLAB para a função fcn_SEL_DL