

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Localização de Falhas em Linhas de Transmissão de Extra-Alta
Tensão: Teoria e Aplicação de Algoritmos com Base em Fasores

Guilherme Bertuol Rodrigues de Queiroz

Itajubá, Julho de 2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Guilherme Bertuol Rodrigues de Queiroz

Localização de Faltas em Linhas de Transmissão de Extra-Alta
Tensão: Teoria e Aplicação de Algoritmos com Base em Fasores

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre
em Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. Paulo Márcio da Silveira

Julho de 2023
Itajubá – MG

Guilherme Bertuol Rodrigues de Queiroz

Localização de Faltas em Linhas de Transmissão de Extra-Alta Tensão: Teoria e Aplicação de Algoritmos com Base em Fasores/ Guilherme Bertuol Rodrigues de Queiroz. – Itajubá – MG, Julho de 2023-
130p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Márcio da Silveira

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá
Programa de pós-graduação em
Engenharia Elétrica, Julho de 2023.

1. Faltas. 2. Linhas de Transmissão. 3. Extra-alta tensão. 4. confiabilidade. 3. Sistema elétrico de potência. 5. Estimação de fasores. 6. Algoritmos de localização de faltas. I. Orientador Prof. Dr. Paulo Márcio da Silveira. II. Universidade Federal de Itajubá. III. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Localização de Faltas em Linhas de Transmissão de Extra-Alta Tensão – Análise dos Parâmetros de Influência na Exatidão.

Guilherme Bertuol Rodrigues de Queiroz

Localização de Falhas em Linhas de Transmissão de Extra-Alta Tensão: Teoria e Aplicação de Algoritmos com Base em Fasores

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Trabalho aprovado. Itajubá – MG, 05 de Julho de 2023:

Prof. Dr. Paulo Márcio da Silveira
Orientador

Prof. Dr. Frederico de Oliveira Passos
Examinador Interno

**Prof. Dr. José Maria de Carvalho
Filho**
Examinador Interno

Prof. Dr. Kleber Melo e Silva
Examinador Externo

Itajubá – MG
Julho de 2023

Agradecimentos

A Deus, infinitamente perfeito, agradeço por conceder a minha vida e revelar o caminho da verdade.

À minha avó, Odette, pelo exemplo de fé, sabedoria e bondade. Aos meus avós, Valmor, Helena e Alfredo, pelos exemplos e inspirações que nos deixaram antes de partirem.

Aos meus pais, Sandra e Eugênio, por todo amor, dedicação, carinho, apoio, exemplos e conselhos. Devo a eles todas as minhas realizações e conquistas.

À minha esposa, Jóisman, pelo amor, cumplicidade, inspiração, confiança e compreensão.

Aos meus irmãos, Rodrigo e Felipe, pela amizade, companheirismo e conselhos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Márcio da Silveira, por essa oportunidade e por todas as suas contribuições.

À Universidade Federal de Itajubá, pela oportunidade de cursar o Mestrado em Engenharia Elétrica.

*Dê-me, Senhor, agudeza para entender, capacidade para reter,
método e faculdade para aprender, sutileza para interpretar,
graça e abundância para falar, acerto ao começar, direção ao progredir
e perfeição ao concluir...*
(Santo Tomás de Aquino)

Resumo

Os algoritmos de localização de faltas apresentam diferentes formulações, requisitos de dados e parâmetros, que os tornam aplicáveis, ou não, à um cenário específico. A compreensão desses requisitos e dos erros característicos em diversos cenários distintos é essencial para permitir a seleção da abordagem mais apropriada. Este trabalho apresenta diversos algoritmos de localização de falta com base em fasores, de um e de dois terminais, analisando os seus desempenhos em casos de faltas reais e faltas simuladas em Linhas de Transmissão de Extra-Alta Tensão.

Os algoritmos apresentados foram implementados em um *software* em ambiente MATLAB[®], para análise das faltas simuladas pelo ATPDRAW[™] e para a análise das faltas reais a partir dos arquivos gerados pelos Relés de Proteção e Registradores Digitais de Perturbação. Os resultados dos desempenhos dos algoritmos foram compilados em gráficos para análise. Foram avaliados os desempenhos para diferentes tipos de faltas, considerando diversas fontes de erro.

Os algoritmos de um terminal utilizados apresentam recursos para reduzir o erro provocado pela resistência de falta, combinada com a corrente de carga e a não homogeneidade do sistema. Os algoritmos de dois terminais solucionam esse problema e apresentam recursos para reduzir o erro por falha de sincronismo. Entretanto, os algoritmos que utilizam a abordagem de componentes simétricos podem apresentar erros consideráveis nos casos de Linhas de Transmissão não transpostas ou com segmentos longos sem transposição. Para esses casos, foram utilizadas abordagens matriciais.

A apresentação teórica dos algoritmos e os resultados das simulações possibilitam indicar a solução mais viável com base nos requisitos de parâmetros, nos dados de entrada disponíveis e nos efeitos das diferentes fontes de erros presentes em cada caso, aprimorando as estimativas de localização de faltas. Quadros apresentando os efeitos das fontes de erros e os requisitos de dados e parâmetros foram elaborados para subsidiar essa escolha. Uma estimativa de localização de falta mais precisa reduz o tempo e o custo para inspeção da Linha de Transmissão, reduzindo o tempo de restauração do sistema, contribuindo para segurança das pessoas, do meio ambiente e do sistema de transmissão. Além de evitar possíveis penalidades financeiras por indisponibilidade dos equipamentos ou indenizações.

Palavras-chave: Faltas, Linhas de Transmissão, Extra-Alta Tensão, sistema elétrico de potência, estimação de fasores, algoritmos de localização de faltas, linhas não transpostas, modelo de parâmetros distribuídos, resistência de falta, resistividade do solo e componente DC de decaimento exponencial.

Abstract

Fault location algorithms present different formulations, data requirements, and parameters that make them applicable or not to a specific scenario. Understanding these requirements and the characteristic errors in different scenarios is essential to enable the selection of the most appropriate approach. This work presents several fault location algorithms based on phasors from one and two terminals and analyzes their performance in cases of actual faults and simulated faults in Extra High Voltage Transmission Lines.

The presented algorithms were implemented in a software in the MATLAB[®] environment for analysis of faults simulated by ATPDRAW[™] and for the analysis of actual faults using files generated by Protection Relays and Digital Fault Recorders. The algorithm performance results were compiled into graphs for analysis. The performances were evaluated for different faults types and different sources of error.

The one-end fault-location algorithms used in this study have features to reduce the error caused by fault resistance combined with load current and system non-homogeneity. The two-end fault-location algorithms solve this problem and have features to reduce error due to synchronization failure. However, algorithms that use the symmetrical components approach can present considerable errors in the case of non-transposed transmission lines or lines with long non-transposed sections. For these cases, matrix-based approaches were used.

The theoretical presentation of the algorithms and the results of the simulations make it possible to indicate the most viable solution based on parameter requirements, available input data, and the effects of different error sources present in each case, improving fault location estimates. Tables presenting the effects of the error sources and input data requirements have been developed to support this choice. A more accurate fault location estimate reduces the time and cost for transmission line inspection, reducing system restoration time, contributing to the safety of people, the environment, and the transmission system, as well as reducing potential financial penalties for equipment unavailability or compensations fines.

Keywords: Faults, Transmission Lines, Extra-High Voltage, Power System, Phasor Estimation, Fault Location Algorithms, Untransposed Lines, Distributed Parameter Model, Fault Resistance, Soil Resistivity, and Exponential Decay DC Component.

Lista de ilustrações

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Falta trifásica em uma LT com duas fontes: G e H. | 29 |
| Figura 2 – Interpretação gráfica do erro devido ao “Efeito de Reatância”. | 30 |
| Figura 3 – Diagrama de circuito equivalente de uma LT de circuito simples e ligação equivalente extra entre os terminais G e H. | 32 |
| Figura 4 – Diagrama unifilar de uma linha de transmissão com abordagem matricial. | 37 |
| Figura 5 – Diagrama do circuito das componentes simétricas da LT com abordagem de parâmetros distribuídos. | 43 |
| Figura 6 – Diagrama unifilar de uma LT com abordagem de matriz de duas portas. | 45 |
| Figura 7 – Sistema modelado no ATPDRAW™ para o Sistema Homogêneo e o Sistema não Homogêneo. | 50 |
| Figura 8 – Geometria das torres predominantes da LT 500 kV Serra da Mesa 2/Luziânia, da LT 500 kV Samambaia/Luziânia e da LT 500 kV Luziânia/-Paracatu 4. | 51 |
| Figura 9 – Sistema modelado para simulação dos casos de LT transposta por seguimento. | 52 |
| Figura 10 – Sistema elétrico estudado. Mapa Geométrico - Rede de Operação - Brasil - Horizonte 2023. | 53 |
| Figura 11 – Sistema elétrico modelado no ANAFAS®. | 54 |
| Figura 12 – Modelo do Sistema Elétrico Real Implementado no ATPDRAW™. | 55 |
| Figura 13 – Falta monofásica a 25 % da LT Transposta, Sistema Homogêneo, $\theta = 0^\circ$, $R_F = 0 \Omega$ e aplicadas no instante de tempo de tensão zero. | 58 |
| Figura 14 – Faltas <i>Shunt</i> Típicas. | 59 |
| Figura 15 – Modelo de falta implementado no ATPDRAW™. | 59 |
| Figura 16 – Exemplo do esquema de transposição por seguimento de uma LT. | 62 |
| Figura 17 – Efeito da transposição da LT nos ABFs: Faltas monofásicas ao longo da LT, Sistema Homogêneo, $\theta = 0^\circ$, $R_F = 10 \Omega$ e aplicadas no instante de tempo do pico de tensão. | 63 |
| Figura 18 – Efeito da transposição da LT nos ABFs: Faltas bifásicas ao longo da LT, Sistema Homogêneo, $\theta = 0^\circ$, $R_F = 5 \Omega$ e aplicadas no instante de tempo do pico de tensão. | 64 |
| Figura 19 – Variações da Resistividade do Solo em função da quantidade de sal, da umidade e da temperatura. | 66 |
| Figura 20 – Efeito da variação da resistividade do solo nos parâmetros da LT. | 66 |

| | |
|---|----|
| Figura 21 – Efeito da imprecisão do parâmetro de Resistividade do Solo nos ABFs: Faltas monofásicas a 40 % LT Transposta com ρ variando de $10 \Omega \text{ m}$ a $5000 \Omega \text{ m}$, Sistema Homogêneo, $\theta = 0^\circ$, $R_F = 10 \Omega$ e aplicadas no instante de tempo do pico de tensão. | 67 |
| Figura 22 – Impacto do “Efeito Reatância” nos ABFs: Faltas monofásicas aplicadas a 50 % da LT Transposta, Sistema Homogêneo e Sistema Não Homogêneo, θ variando de -40° a 40° , $R_F = 1 \Omega$ e 50Ω e aplicadas no instante de tempo do pico de tensão. | 69 |
| Figura 23 – Falta monofásica a 25 % da LT Transposta, Sistema Homogêneo, $\theta = 0^\circ$, $R_F = 0 \Omega$ e aplicadas no instante de tempo de tensão zero. | 71 |
| Figura 24 – Análise do efeito da Componente <i>DC</i> de decaimento exponencial nos ABFs: Faltas monofásicas aplicadas a 50 % da LT Transposta, Sistema Homogêneo, $\theta = 0^\circ$, $R_F = 0 \Omega$, variando o instante de aplicação da falta e utilizando o Filtro <i>DFT</i> e o Filtro <i>ACM</i> | 72 |
| Figura 25 – Localização do BCS em relação aos TPs. | 73 |
| Figura 26 – Diagrama Unifilar dos BCSs da LT 500 kV Serra da Mesa 2/Luziânia. | 74 |
| Figura 27 – Comparação das correntes dos terminais com, e sem, os BCSs. Faltas monofásicas a 30 % da LT Transposta, Sistema Homogêneo, $\theta = 0^\circ$, $R_F = 5 \Omega$ e aplicadas no instante de tempo do pico de tensão. | 75 |
| Figura 28 – Efeito da oscilação sub-harmônica na impedância vista pelo terminal H. Faltas monofásicas a 30 % da LT Transposta, Sistema Homogêneo, $\theta = 0^\circ$, $R_F = 5 \Omega$ e aplicadas no instante de tempo do pico de tensão. | 75 |
| Figura 29 – Efeito dos BCSs nos ABFs: Faltas monofásicas aplicadas ao longo da LT, Sistema Homogêneo, $\theta = 0^\circ$, $R_F = 5 \Omega$ e aplicadas no instante de tempo do pico de tensão. | 77 |
| Figura 30 – Efeito dos BCSs nos ABFs: Faltas bifásicas aplicadas ao longo da LT, Sistema Homogêneo, $\theta = 0^\circ$, $R_F = 5 \Omega$ e aplicadas no instante de tempo do pico de tensão. | 78 |
| Figura 31 – Efeito do erro de sincronismo nos ABFs: Faltas monofásicas ($R_F = 50 \Omega$), faltas bifásicas ($R_F = 5 \Omega$) e bifásicas terra ($R_F = 10 \Omega$) aplicadas a 40 % da LT Transposta, Sistema Homogêneo, $\theta = 0^\circ$, $R_F = 0 \Omega$, aplicadas no instante de tempo do pico de tensão e com erro de sincronismo variando de -180° a 180° | 79 |
| Figura 32 – Faltas Monofásicas aplicadas ao longo da LT 500 kV Samambaia/Luziânia, Modelo do Sistema Elétrico Real, $\theta = 0^\circ$, $R_F = 15 \Omega$ e aplicadas no instante de tempo de pico de tensão. | 80 |
| Figura 33 – Geometria das torres predominantes da LT 500 kV Samambaia/Emborcação. | 81 |

| | |
|--|----|
| Figura 34 – Simulação do religamento sob falta trifásica a 50 % da LT 500 kV Samambaia/Emborcação, Modelo do Sistema Elétrico Real e $R_F = 1 \Omega$. | 82 |
| Figura 35 – Falta monofásicas aplicadas ao longo da LT 500 kV Serra da Mesa 2/Luziânia com os BCSs e Reatores em operação, Modelo do Sistema Elétrico Real, $\theta = 0^\circ$, $R_F = 15 \Omega$ e aplicadas no instante de tempo do pico de tensão. | 83 |
| Figura 36 – Interface gráfica do programa implementado em ambiente MATLAB® para análise das faltas simuladas pelo ATPDRAW™ e das faltas reais com os registros COMTRADE. | 86 |
| Figura 37 – Estudo de Caso 1 – Falta monofásica fase azul na LT 500 kV Samambaia/Luziânia, causada por descarga atmosférica, a 32,84 % da SE Samambaia, $\theta = 3^\circ$ e $R_F = 0,5 \Omega$. | 87 |
| Figura 38 – Estudo de Caso 2 – Falta bifásica entre as fases azul e vermelha na LT 500 kV Samambaia/Luziânia, causada por toque dos condutores provocado por vento, a 79,10 % da SE Samambaia, $\theta = 3,7^\circ$ e $R_F = 0 \Omega$. | 88 |
| Figura 39 – Estudo de Caso 3 – Falta bifásica entre as fases branca e vermelha na LT 500 kV Luziânia/Paracatu 4, causada por toque dos condutores provocado por vento, a 2 % da SE Luziânia e $\theta = -1,7^\circ$ e $R_F = 0,5 \Omega$. | 89 |
| Figura 40 – Estudo de Caso 4 – Falta bifásica entre as fases azul e branca na LT 500 kV Luziânia/Paracatu 4, causada por queimada, a 78 % da SE Luziânia, $\theta = 11^\circ$ e $R_F = 0,5 \Omega$. | 90 |
| Figura 41 – Estudo de Caso 5 – Falta monofásica fase azul na LT 500 kV Samambaia/Emborcação, causada por queda de torre, a 19 % da SE Samambaia, $\theta = 4^\circ$ e $R_F = 2 \Omega$. | 91 |
| Figura 42 – Estudo de Caso 6 – Religamento sob falta trifásica na LT 500 kV Samambaia/Emborcação, causada por queda de torre, a 18,84 % da SE Samambaia e $R_F = 0 \Omega$. | 92 |
| Figura 43 – Estudo de Caso 7 – Falta bifásica terra entre a fase azul, a fase branca e o solo na LT 500 kV Samambaia/Emborcação, causada por contato com árvore, a 86,96 % da SE Samambaia, $\theta = 3^\circ$ e $R_F = 6 \Omega$. | 93 |
| Figura 44 – Estudo de Caso 8 – Falta monofásica fase vermelha na LT 500 kV Serra da Mesa 2/Luziânia, causada por contato com a estrutura provocado por vento, a 0,1 % da SE Serra da Mesa 2, $\theta = 18^\circ$ e $R_F = 0 \Omega$. | 94 |
| Figura 45 – Estudo de Caso 9 – Falta bifásica entre as fases branca e vermelha na LT 500 kV Serra da Mesa 2/Luziânia, causada pelo toque dos condutores provocado por vento, a 43 % da SE Serra da Mesa 2, $\theta = -11^\circ$ e $R_F = 0,5 \Omega$. | 95 |

| | |
|--|-----|
| Figura 46 – Estudo de Caso 10 – Falta monofásica fase branca na LT 500 kV Serra da Mesa 2/Luziânia, provocada por descarga atmosférica, a 72,94 % da SE Serra da Mesa 2, $\theta = 24^\circ$ e $R_F = 0 \Omega$ | 96 |
| Figura 47 – Estudo de Caso 11 – Falta monofásica fase azul na LT 500 kV Serra da Mesa 2/Luziânia, provocada por excremento de pássaro, a 94,65 % da SE Serra da Mesa 2, $\theta = -7^\circ$, $R_F = 0,3 \Omega$ | 97 |
| Figura 48 – Sistema elétrico estudado. Mapa Geométrico – Rede de Operação do Brasil – Horizonte 2023. | 106 |
| Figura 49 – Sistema elétrico modelado no ANAFAS [®] | 107 |
| Figura 50 – Modelo do Sistema Elétrico Real implementado no ATPDRAW [™] | 107 |
| Figura 51 – Equivalentes de <i>Thévenin</i> do sistema elétrico, para aplicação dos algoritmos: Wiszniewski (1983), Takagi Modificado, Izykowski (2008) e Saha <i>et al.</i> (1999). | 108 |
| Figura 52 – Curva característica de tensão e de corrente dos MOVs da LT 500 kV Serra da Mesa 2/Luziânia. | 112 |
| Figura 53 – Curva característica de tensão e de corrente dos MOVs da LT 500 kV Rio das Éguas/Luziânia. | 112 |
| Figura 54 – Geometria de Torre do Modelo LT1 | 117 |
| Figura 55 – Geometria de Torre do Modelo LT2. | 118 |
| Figura 56 – Geometria de Torre do Modelo LT4. | 120 |
| Figura 57 – Geometria de Torre do Modelo LT5. | 122 |
| Figura 58 – Geometria de Torre do Modelo LT6. | 123 |
| Figura 59 – Exemplo da matriz de impedância gerada pela rotina <i>Line Constants</i> do ATPDRAW [™] | 125 |
| Figura 60 – Exemplo da matriz de susceptância gerada pela rotina <i>Line Constants</i> do ATPDRAW [™] | 125 |
| Figura 61 – Exemplo de esquema de transposição. | 125 |
| Figura 62 – Exemplo dos parâmetros de sequência zero e sequência positiva gerados pela rotina <i>Line Constants</i> do ATPDRAW [™] | 128 |

Lista de quadros

| | |
|--|-----|
| Quadro 1 – Composição dos sinais de corrente e de tensão para os diferentes tipos de faltas. | 31 |
| Quadro 2 – Coeficientes complexos usados para determinar o fator de distribuição de corrente para sequências positiva e negativa. | 32 |
| Quadro 3 – Conjunto dos coeficientes de ponderação para cálculo das tensões e correntes dos terminais para cada tipo de falta. | 36 |
| Quadro 4 – Conjunto de coeficientes de ponderação para cálculo da corrente de falta com a eliminação da sequência zero e a priorização do uso da sequência negativa. | 36 |
| Quadro 5 – Determinação da matriz de faltas para os diferentes tipos de faltas. . . | 38 |
| Quadro 6 – Resumo dos requisitos dos ABFs. | 48 |
| Quadro 7 – Valores típicos de resistividade de alguns tipos de solo. | 65 |
| Quadro 8 – Resumo das fontes de erro que afetam os algoritmos de localização de faltas. | 85 |
| Quadro 9 – Descrição dos ajustes dos parâmetros dos condutores das LTs <i>LCC Template</i> do ATPDRAW™. | 114 |
| Quadro 10 – Ajustes dos parâmetros do <i>LCC Template</i> do ATPDRAW™. | 115 |

Lista de tabelas

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 – Equivalentes de <i>Thévenin</i> do Sistema Homogêneo. | 50 |
| Tabela 2 – Parâmetros da LT Transposta utilizada nas simulações. | 50 |
| Tabela 3 – Equivalentes de <i>Thévenin</i> do Sistema não Homogêneo. | 51 |
| Tabela 4 – Resultados das simulações de faltas trifásicas e monofásicas francas nos modelos do ANAFAS [®] e do ATPDRAW [™] | 55 |
| Tabela 5 – Resumo dos resultados da aplicação dos ABFs em faltas reais. | 98 |
| Tabela 6 – Ligações equivalentes entre as barras calculadas pelo ANAFAS [®] | 105 |
| Tabela 7 – Equivalentes de <i>Thévenin</i> entre as barras de fronteira e a referência calculados pelo ANAFAS [®] | 108 |
| Tabela 8 – Equivalentes de <i>Thévenin</i> do terminal G, para aplicação dos algoritmos: Wiszniewski (1983), Takagi Modificado, Izykowski (2008) e Saha <i>et al.</i> (1999). | 109 |
| Tabela 9 – Equivalentes de <i>Thévenin</i> do terminal H, para aplicação dos algoritmos: Wiszniewski (1983), Takagi Modificado, Izykowski (2008) e Saha <i>et al.</i> (1999). | 109 |
| Tabela 10 – Equivalente de <i>Thévenin</i> da ligação entre as barras G e H, para aplicação dos algoritmos: Wiszniewski (1983), Takagi Modificado e Izykowski (2008). | 110 |
| Tabela 11 – Dados dos Bancos de Capacitores Série | 111 |
| Tabela 12 – Dados dos Reatores. | 113 |
| Tabela 13 – Ajustes dos parâmetros do <i>LCC Template</i> do ATPDRAW [™] para o Modelo LT1, LT3, LT7 e LT8. | 116 |
| Tabela 14 – Ajustes dos parâmetros do <i>LCC Template</i> do ATPDRAW [™] para o Modelo LT2. | 119 |
| Tabela 15 – Ajustes dos parâmetros do <i>LCC Template</i> do ATPDRAW [™] para o Modelo LT3. | 119 |
| Tabela 16 – Ajustes dos parâmetros do <i>LCC Template</i> do ATPDRAW [™] para o Modelo LT4. | 121 |
| Tabela 17 – Ajustes dos parâmetros do <i>LCC Template</i> do ATPDRAW [™] para o Modelo LT5. | 122 |
| Tabela 18 – Ajustes dos parâmetros do <i>LCC Template</i> do ATPDRAW [™] para o Modelo LT6. | 123 |
| Tabela 19 – Ajustes dos parâmetros do <i>LCC Template</i> do ATPDRAW [™] para o Modelo LT7. | 124 |
| Tabela 20 – Ajustes dos parâmetros do <i>LCC Template</i> do ATPDRAW [™] para o Modelo LT8. | 124 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 21 – Impedância e susceptância mutuas e próprias por unidade de comprimento das linhas de transmissão, calculadas com a rotina <i>Line Constants</i> do ATPDRAW TM | 127 |
| Tabela 22 – Resistência, reatância e susceptância de sequência positiva e zero por unidade de comprimento das linhas de transmissão calculadas com a rotina <i>Line Constants</i> do ATPDRAW TM | 128 |
| Tabela 23 – Impedâncias características e constante de propagação de sequência positiva e zero das LTs calculadas com a rotina <i>Line Constants</i> do ATPDRAW TM | 128 |
| Tabela 24 – Impedâncias de sequência positiva e zero das LTs calculadas com a rotina <i>Line Constants</i> do ATPDRAW TM | 129 |
| Tabela 25 – Impedâncias de sequência positiva e zero das LTs de acordo com a base de dados do ONS. | 130 |

Lista de abreviaturas e siglas

| | |
|----------|--|
| ABF | Algoritmo de Localização de Faltas com Base em Fasores. |
| ACM | Algoritmo Cosseno Modificado. |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica. |
| BCS | Banco de Compensação Série. |
| COMTRADE | <i>Common Format for Transient Data Exchange.</i> |
| DFT | Transformada Discreta de Fourier (Discrete Fourier Transform). |
| EAT | Extra-alta Tensão. |
| FT | Função de Transmissão. |
| LT | Linha de Transmissão. |
| MOV | <i>Metal Oxide Varistor.</i> |
| ONS | Operador Nacional do Sistema Elétrico. |
| PMU | <i>Phasor Measurement Unit.</i> |
| PRs | Procedimentos de Rede. |
| PVI | Parcela Variável por Indisponibilidade. |
| RDP | Registrador Digitais de Perturbação. |
| SIN | Sistema Interligado Nacional. |
| TC | Transformador de Corrente. |
| TP | Transformador de Potencial. |

Lista de símbolos

| | |
|---------------|--|
| β_{kG} | Ângulo do fator de distribuição de corrente de falta do terminal G da componente de sequência k (0 – Sequência zero, 1 – Positiva e 2 – Negativa). |
| β_G | Ângulo do fator de distribuição de corrente de falta do terminal G. |
| γ | Constante de propagação. |
| γ_k | Constante de propagação da componente de sequência k (0 – Sequência zero, 1 – Positiva e 2 – Negativa). |
| δ | Ângulo de sincronização entre os terminais G e H. |
| θ | Ângulo de carga da Linha de Transmissão. |
| σ_{kG} | Ângulo do fator de carga do circuito do terminal G da componente de sequência k (0 – Sequência zero, 1 – Positiva e 2 – Negativa). |
| σ_G | Ângulo do fator de carga do circuito do terminal G. |
| ϕ | Ângulo da impedância da linha. |
| ω | Velocidade angular. |
| ω_0 | Velocidade angular do fasor em rotação constante. |
| \Im | Componente Imaginária. |
| \Re | Componente Real. |
| * | Conjugado. |
| d_{kG} | Fator de distribuição de corrente de falta do terminal G da componente de sequência k (0 – Sequência zero, 1 – Positiva e 2 – Negativa). |
| d_G | Fator de distribuição de corrente de falta do terminal G. |
| $E_{\%}$ | Erro relativo com base no comprimento de linha (em %). |
| E_a | Erro absoluto. |
| E_l | Erro relativo com base no comprimento de linha (em pu). |
| E_t | Erro relativo tradicional. |

| | |
|-----------------|--|
| $I_{G,A}$ | Corrente do terminal G Fase A. |
| $I_{G,B}$ | Corrente do terminal G Fase B. |
| $I_{G,C}$ | Corrente do terminal G Fase C. |
| I_{Gpre} | Corrente de carga do terminal G. |
| $I_{H,A}$ | Corrente do terminal H Fase A. |
| $I_{H,B}$ | Corrente do terminal H Fase B. |
| $I_{H,C}$ | Corrente do terminal H Fase C. |
| I_{Hpre} | Corrente de carga do terminal H. |
| I_{kF} | Corrente de falta da componente de sequência k (0 – Sequência zero, 1 – Positiva e 2 – Negativa). |
| I_{kG} | Corrente do terminal G da componente de sequência k (0 – Sequência zero, 1 – Positiva e 2 – Negativa). |
| I_{kH} | Corrente do terminal H da componente de sequência k (0 – Sequência zero, 1 – Positiva e 2 – Negativa). |
| I_F | Corrente de falta. |
| I_G | Corrente do terminal G. |
| I_H | Corrente do terminal H. |
| ΔI_G | Corrente de “falta pura” do terminal G. |
| ΔI_{kG} | Corrente de “falta pura” do terminal G de sequência k (0 – Sequência zero, 1 – Positiva e 2 – Negativa). |
| ΔI_H | Corrente de “falta pura” do terminal H. |
| ΔI_{kH} | Corrente de “falta pura” do terminal H de sequência k (0 – Sequência zero, 1 – Positiva e 2 – Negativa). |
| k | Componente Simétrica (0 – Sequência zero, 1 – Positiva e 2 – Negativa). |
| K_{0m} | Fator de compensação de sequência zero para o acoplamento mútuo (linha paralela). |
| k_0 | Fator de compensação de sequência zero. |
| l | Comprimento da linha (km). |

| | |
|-----------------|---|
| l_f | Distância para a falta calculada (km). |
| l_r | Distância para a falta real (km). |
| m | Distância para a falta calculada por unidade de comprimento de linha (p.u ou % da LT). |
| M | Modo natural (1 – Modo 1, 2 – Modo 2 e 3 – Modo 3). |
| m_r | Distância para a falta real por unidade de comprimento de linha (p.u ou % da LT). |
| n_{kG} | Fator de carga do circuito do terminal G da componente de sequência k (0 – Sequência zero, 1 – Positiva e 2 – Negativa). |
| n_G | Fator de carga do circuito do terminal G. |
| R_{FG} | Resistência de falta medida do terminal G. |
| R_{kL} | Resistência de falta da componente de sequência k (0 – Sequência zero, 1 – Positiva e 2 – Negativa). |
| R_F | Resistência de falta. |
| $V_{G,A}$ | Tensão do terminal G Fase A. |
| $V_{G,B}$ | Tensão do terminal G Fase B. |
| $V_{G,C}$ | Tensão do terminal G Fase C. |
| V_{kF} | Tensão de falta da componente de sequência k (0 – Sequência zero, 1 – Positiva e 2 – Negativa). |
| V_{kG} | Tensão do terminal G da componente de sequência k (0 – Sequência zero, 1 – Positiva e 2 – Negativa). |
| V_{kH} | Tensão do terminal H da componente de sequência k (0 – Sequência zero, 1 – Positiva e 2 – Negativa). |
| V_F | Tensão no ponto de falta. |
| V_G | Tensão do terminal H. |
| V_H | Tensão do terminal G. |
| ΔV_G | Diferença de tensão do terminal G entre a pré e a pós-falta. |
| ΔV_{kG} | Diferença de tensão do terminal G entre a pré e a pós-falta para componente de sequência k (0 – Sequência zero, 1 – Positiva e 2 – Negativa). |

| | |
|-----------------|--|
| ΔV_H | Diferença de tensão do terminal H entre a pré e a pós-falta. |
| ΔV_{kH} | Diferença de tensão do terminal H entre a pré e a pós-falta para componente de sequência k (0 – Sequência zero, 1 – Positiva e 2 – Negativa). |
| X_{FG} | Reatância da falta medida do terminal G. |
| X_L | Reatância da linha de transmissão. |
| Z_{0m} | Impedância mútua de sequência zero. |
| Z_{FG} | Impedância aparente da falta medida do terminal G. |
| Z_{kC} | Impedância característica da componente de sequência k (0 – Sequência zero, 1 – Positiva e 2 – Negativa). |
| Z_{kE} | Impedância aparente da ligação equivalente extra entre os terminais G e H da componente de sequência k (0 – Sequência zero, 1 – Positiva e 2 – Negativa). |
| Z_{kFG} | Impedância aparente da falta medida do terminal G da componente de sequência k (0 – Sequência zero, 1 – Positiva e 2 – Negativa). |
| Z_{kG} | Impedância aparente do equivalente de <i>Thévenin</i> do terminal G da componente de sequência k (0 – Sequência zero, 1 – Positiva e 2 – Negativa). |
| Z_{kH} | Impedância aparente do equivalente de <i>Thévenin</i> do terminal H da componente de sequência k (0 – Sequência zero, 1 – Positiva e 2 – Negativa). |
| Z_{kL} | Impedância da linha de transmissão da componente de sequência k (0 – Sequência zero, 1 – Positiva e 2 – Negativa). |
| Z_{kP} | Impedância aparente do equivalente de <i>Thévenin</i> da ligação extra entre as barras G e H da componente de sequência k (0 – Sequência zero, 1 – Positiva e 2 – Negativa). |
| Z_C | Impedância característica. |
| Z_G | Impedância aparente do equivalente de <i>Thévenin</i> do terminal G. |
| Z_H | Impedância aparente do equivalente de <i>Thévenin</i> do terminal H. |
| Z_L | Impedância da linha de transmissão. |
| Z_E | Impedância aparente do equivalente de <i>Thévenin</i> da ligação extra entre as barras G e H. |

| | |
|------------|---|
| E_G | Matriz coluna da fonte de tensão do terminal G. |
| E_H | Matriz coluna da fonte de tensão do terminal H. |
| I_F | Corrente total de falta. |
| I_G | Matriz coluna de corrente trifásica do terminal G. |
| I_{Gpre} | Matriz coluna de corrente de carga trifásica do terminal G. |
| I_H | Matriz coluna de corrente trifásica do terminal H. |
| I | Matriz coluna de corrente trifásica. |
| K_F | Matriz de falta. |
| V_F | Tensão no ponto de falta. |
| V_G | Matriz coluna de tensão trifásica do terminal G. |
| V_H | Matriz coluna de tensão trifásica do terminal H. |
| V | Matriz coluna de tensão trifásica. |
| Y_L | Matriz de admitância da LT. |
| Z_G | Matriz de impedância do Terminal G. |
| Z_H | Matriz de impedância do Terminal H. |
| Z_L | Matriz de impedância da LT. |
| Z | Matriz de impedância. |

Sumário

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 24 |
| 1.1 | Relevância do tema | 25 |
| 1.2 | Objetivos e contribuições da dissertação | 25 |
| 1.3 | Estrutura da dissertação | 26 |
| 2 | REFERENCIAIS TEÓRICOS | 28 |
| 2.1 | Considerações Iniciais | 28 |
| 2.2 | Algoritmos de localização de faltas com base em fasores de um terminal | 28 |
| 2.2.1 | Algoritmo da Reatância | 32 |
| 2.2.2 | Wiszniewski (1983) | 33 |
| 2.2.3 | Takagi <i>et al.</i> (1982) | 33 |
| 2.2.4 | Takagi Modificado | 34 |
| 2.2.5 | Izykowski (2008) | 34 |
| 2.2.6 | Saha <i>et al.</i> (1999) | 37 |
| 2.3 | Algoritmos de localização de faltas com base em fasores de dois terminais | 40 |
| 2.3.1 | Saha <i>et al.</i> (2009) | 40 |
| 2.3.2 | Izykowski <i>et al.</i> (2005) | 41 |
| 2.3.3 | Izykowski <i>et al.</i> (2011) | 42 |
| 2.3.4 | Girgis <i>et al.</i> (1992) | 43 |
| 2.3.5 | Johns e Jamali (1990) | 45 |
| 2.4 | Considerações finais | 47 |
| 3 | MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÕES | 49 |
| 3.1 | Considerações Iniciais | 49 |
| 3.2 | Sistema Homogêneo | 49 |
| 3.3 | Sistema não Homogêneo | 49 |
| 3.4 | Linha de Transmissão | 50 |
| 3.5 | Sistema elétrico real | 52 |
| 3.6 | Cálculo do desempenho dos ABFs | 56 |
| 3.7 | Modelo de falta | 57 |
| 3.8 | Considerações Finais | 57 |
| 4 | APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS CASOS DE FALTAS SIMULADAS | 60 |

| | | |
|-------|--|-----------|
| 4.1 | Considerações Iniciais | 60 |
| 4.2 | Efeito da transposição da LT no desempenho dos ABFs | 60 |
| 4.3 | Efeito da imprecisão do parâmetro de Resistividade do Solo no desempenho dos ABFs | 65 |
| 4.4 | Efeito da Resistência de Falta, da Variação de Carga e do Sistema não Homogêneo no desempenho dos ABFs | 68 |
| 4.5 | Efeito da Componente <i>DC</i> de decaimento exponencial no desempenho dos ABFs | 70 |
| 4.6 | Efeito do Banco de Capacitor Série — BCS — no desempenho dos ABFs | 73 |
| 4.7 | Efeito do Erro de sincronismo no desempenho dos ABFs | 79 |
| 4.8 | Aplicação dos ABFs no Modelo do Sistema Elétrico Real | 80 |
| 4.8.1 | Resultados dos ABFs em faltas simuladas ao longo de uma LT curta | 80 |
| 4.8.2 | Resultados dos ABFs na simulação de religamento sob falta em uma LT longa com compensação <i>shunt</i> | 81 |
| 4.8.3 | Resultados dos ABFs em faltas simuladas ao longo de uma LT longa com compensação série e <i>shunt</i> | 82 |
| 4.9 | Considerações finais | 84 |
| 5 | APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS CASOS DE FALTAS REAIS REGISTRADAS NO SIN | 86 |
| 5.1 | Considerações Iniciais | 86 |
| 5.2 | Estudo de Caso 1 – Falta monofásica a 33% de uma LT curta | 87 |
| 5.3 | Estudo de Caso 2 – Falta bifásica a 79% de uma LT curta | 88 |
| 5.4 | Estudo de Caso 3 – Falta bifásica a 2% de uma LT média | 89 |
| 5.5 | Estudo de Caso 4 – Falta bifásica a 78% de uma LT média | 90 |
| 5.6 | Estudo de Caso 5 – Falta monofásica a 19% de uma LT longa com compensação <i>shunt</i> | 91 |
| 5.7 | Estudo de Caso 6 – Religamento sob Falta trifásica a 19% de uma LT longa com compensação <i>shunt</i> | 92 |
| 5.8 | Estudo de Caso 7 – Falta bifásica terra a 87% de uma LT longa com compensação <i>shunt</i> | 93 |
| 5.9 | Estudo de Caso 8 – Falta monofásica a 0% de uma LT longa com compensação <i>shunt</i> e série | 94 |
| 5.10 | Estudo de Caso 9 – Falta bifásica a 43% de uma LT longa com compensação <i>shunt</i> e série | 95 |
| 5.11 | Estudo de Caso 10 – Falta monofásica a 73% de uma LT longa com compensação <i>shunt</i> e série | 96 |
| 5.12 | Estudo de Caso 11 – Falta monofásica a 95% de uma LT longa com compensação <i>shunt</i> e série | 97 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| 5.13 | Considerações Finais | 98 |
| 6 | CONCLUSÃO | 99 |
| | REFERÊNCIAS | 101 |
| | APÊNDICES | 104 |
| | APÊNDICE A – MODELAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO . . | 105 |
| A.1 | Bancos de Capacitores Série – BCSs – e Reatores | 111 |
| A.2 | Linhas de Transmissão | 114 |
| A.2.1 | Modelo de Linha de Transmissão 1 – Modelo LT1 | 116 |
| A.2.2 | Modelo de Linha de Transmissão 2 – Modelo LT2 | 118 |
| A.2.3 | Modelo de Linha de Transmissão 3 – Modelo LT3 | 118 |
| A.2.4 | Modelo de Linha de Transmissão 4 – Modelo LT4 | 120 |
| A.2.5 | Modelo de Linha de Transmissão 5 – Modelo LT5 | 122 |
| A.2.6 | Modelo de Linha de Transmissão 6 – Modelo LT6 | 123 |
| A.2.7 | Modelo de Linha de Transmissão 7 – Modelo LT7 | 124 |
| A.2.8 | Modelo de Linha de Transmissão 8 – Modelo LT8 | 124 |
| A.2.9 | Resultados obtidos | 125 |

1 Introdução

O rápido crescimento dos sistemas de energia elétrica, observado nas últimas décadas, resultou no aumento expressivo da quantidade de Linhas de Transmissão – LTs – em operação no mundo. A livre comercialização e a desregulamentação impõem requisitos cada vez mais rígidos ao fornecimento de uma fonte de alimentação contínua, de boa qualidade e de baixo custo. As condições da continuidade, da segurança e da confiabilidade desse fornecimento desempenham papéis muito importantes para os sistemas de energia contemporâneos. A alta qualidade dos dispositivos de proteção e controle, incluindo suas funções de localização de faltas, é primordial para o atendimento desses requisitos impostos (SAHA *et al.*, 2009).

O Sistema Interligado Nacional – SIN – do Brasil é um sistema de produção e transmissão de energia de grande porte com múltiplos titulares de concessão, permissão ou autorização para exploração dos serviços de energia elétrica. A capacidade de geração instalada é de, aproximadamente, 206 GW com predominância de usinas hidrelétricas, 53 %, distribuídas nas diferentes regiões do Brasil com regimes hidrológicos distintos. A interconexão dessas regiões pelo sistema de transmissão do SIN propicia a transferência de energia entre as regiões, explorando a diversidade dos regimes hidrológicos e permitindo o atendimento com segurança e economia com a utilização estratégica das usinas térmicas, eólicas, solares e outras. Esse sistema de transmissão conta com, aproximadamente, 179 311 km de LTs – sendo 50 % em extra-alta tensão – EAT – em 345 kV, 440 kV, 500 kV e 750 kV (ONS, 2023). O Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS – é o órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica do SIN sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL.

A qualidade do serviço das concessionárias de transmissão de energia é aferida por indicadores definidos pela ANEEL e apurados pelo ONS, que estão associados à disponibilidade dos equipamentos principais e complementares das Funções de Transmissão – FTs. Entre esses indicadores está a Parcela Variável por Indisponibilidade – PVI – que é uma parcela a ser deduzida do pagamento base de uma FT pela sua indisponibilidade, impactando diretamente na receita dos agentes de transmissão (ANEEL, 2020). Outra atribuição do ONS é propor regras para a operação das instalações de transmissão da rede básica do SIN a serem aprovadas pela ANEEL e consolidadas nos Procedimentos de Rede – PRs, que são documentos de caráter normativo.

A análise de faltas em equipamentos e linhas de transmissão é definida nos PRs que apresentam a sistemática para detecção das causas da falta em uma LT (ONS, 2022,

Submódulo 6.4). É atribuída, aos agentes de transmissão, a responsabilidade de realizar inspeção visual, com registros fotográficos, tão logo seja constatada a falta com o objetivo de identificar a origem da falta e quais foram suas causas. A precisão da estimativa do local da falta é fundamental para aumentar a eficiência da equipe de manutenção na inspeção visual dentro dos prazos exigidos pelo ONS.

1.1 Relevância do tema

A precisão da estimativa do local da falta em LTs é de extrema importância para reduzir o tempo de recomposição nas ocorrências de faltas permanentes e para evitar a recorrência de faltas fugitivas, sendo então fundamental para a segurança das pessoas, do meio ambiente e do SIN. Portanto, tem impacto na possível indisponibilidade das FTs e, conseqüentemente, na incidência de PVI, além de possíveis indenizações, influenciando no resultado financeiro das transmissoras de energia.

As diferentes técnicas aplicadas em localização de faltas apresentam vantagens e desvantagens e se diferem entre si em relação a vários aspectos que podem estar relacionados às características da falta, à topologia do sistema, aos recursos do sistema de aquisição de dados, à sincronização de tempo, às condições de operação do sistema, ao custo financeiro e outros. Várias técnicas são propostas para reduzir o impacto das fontes críticas de erros e fornecer uma estimativa de localização de falta mais precisa.

O ONS define os requisitos mínimos para os sistemas de proteção, de registro de perturbações e de teleproteção (ONS, 2022, Submódulo 2.11), mas não há definição da técnica de localização de faltas a ser aplicada nas linhas de transmissão do SIN. Os relés de proteção previstos nos requisitos dos PRs apresentam, em geral, algoritmos de localização de faltas com base em fasores com as informações de um terminal. A instalação de equipamentos que utilizam algoritmos baseados em ondas viajantes não é obrigatória.

Os registros de oscilografias dos relés de proteção e dos Registradores Digitais de Perturbações – RDP, também previstos nos requisitos dos PRs, podem ser utilizados para aplicação dos algoritmos de localização de faltas com base em fasores de dois terminais, o que torna o estudo desses algoritmos relevante e diretamente aplicável à tecnologia atual utilizada no SIN.

1.2 Objetivos e contribuições da dissertação

Os algoritmos de localização de faltas apresentam diferentes requisitos, utilizando dados de entrada, parâmetros e considerações, que os tornam aplicáveis ou não à um cenário específico. A compreensão desses requisitos e dos erros característicos em diversos cenários distintos é essencial para permitir a seleção da abordagem mais apropriada. Este

trabalho apresenta os referenciais teóricos, detalhando os requisitos de formulação, os parâmetros e os dados de entrada de diversos Algoritmos de Localização de Falhas com Base em Fasores – ABFs.

Serão abordados os algoritmos de localização de faltas com base em fasores de um terminal: A partir das medições de impedância vista pelo terminal; com uso de fatores de distribuição de corrente de falta; com base em componentes simétricos; e aplicáveis a linhas não transpostas. Serão apresentados, também, algoritmos de localização de faltas com base em fasores de dois terminais: com base no modelo de linha de parâmetros concentrados; com base no modelo de linha de parâmetro distribuído; e aplicáveis a linhas não transpostas ou com longos trechos sem transposição.

Esses algoritmos serão aplicados em casos simulados e casos reais de faltas em LTs de EAT. Serão avaliados os desempenhos para diferentes tipos de faltas (monofásica, bifásica, bifásica com terra e trifásica) e com as seguintes fontes de erro: LTs não transpostas, ou com longos trechos sem transposição; imprecisão da resistividade do solo; resistência de falta; variação da carga do sistema; não homogeneidade do sistema; componente *DC* de decaimento exponencial; presença de Banco de Capacitores Série; e erro de sincronização de dados. Outras fontes de erro não serão abordadas como: Saturação dos Transformadores de Corrente – TC; LTs de três terminais; LTs não homogêneas; deslocamento de fase causado pelos Transformadores de Potencial – TP – e TCs; e acoplamento mútuo em LTs paralelas.

As abordagens de localização de faltas mais adequadas a serem aplicadas a um determinado sistema monitorado serão definidas com base nos resultados encontrados nas simulações e nos casos reais. A escolha de uma abordagem mais adequada é fundamental para melhorar a estimativa de localização, reduzindo o tempo para inspeção da LT e o tempo de restauração do sistema. Portanto, contribui para segurança das pessoas, do meio ambiente e do SIN e para redução de possíveis penalidades financeiras por PVI e indenizações.

1.3 Estrutura da dissertação

O trabalho foi realizado com a seguinte estrutura, para cumprir os objetivos propostos:

- No Capítulo 2, são apresentados os referenciais teóricos para compreender as formulações dos ABFs, determinar os requisitos de dados e de parâmetros e identificar os diferentes fatores que impactam a precisão das estimativas de localização;
- No Capítulo 3, são apresentados os modelos dos Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica utilizados nas simulações;

-
- No Capítulo 4, são apresentados os resultados das simulações para os estudos dos efeitos de diversas fontes de erros no desempenho dos ABFs;
 - No Capítulo 5, são apresentados os exemplos de aplicação dos ABFs em faltas reais que ocorreram em LTs de EAT em operação no SIN;
 - No Capítulo 6, são apresentadas as considerações finais e as principais conclusões obtidas no desenvolvimento deste trabalho, bem como algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 Referenciais Teóricos

2.1 Considerações Iniciais

As diferentes técnicas de localização de faltas podem ser categorizadas em dois grupos principais: algoritmos com base em fasores e algoritmos com base em ondas viajantes. Este capítulo apresenta diversos Algoritmos de Localização de Faltas com Base em Fasores – ABF – com dados de um terminal e de dois terminais. A escolha da melhor abordagem de localização de faltas é uma tarefa difícil e requer uma compreensão detalhada do princípio de funcionamento de cada algoritmo (DAS *et al.*, 2014). Esses algoritmos apresentam particularidades e se distinguem quanto aos dados de entrada, aos modelos de linhas de transmissão e às considerações feitas para calcular a estimativa da localização da falta. O objetivo deste capítulo é apresentar os subsídios teóricos para essa compreensão e identificar os diferentes fatores que afetam a precisão das estimativas de localização.

2.2 Algoritmos de localização de faltas com base em fasores de um terminal

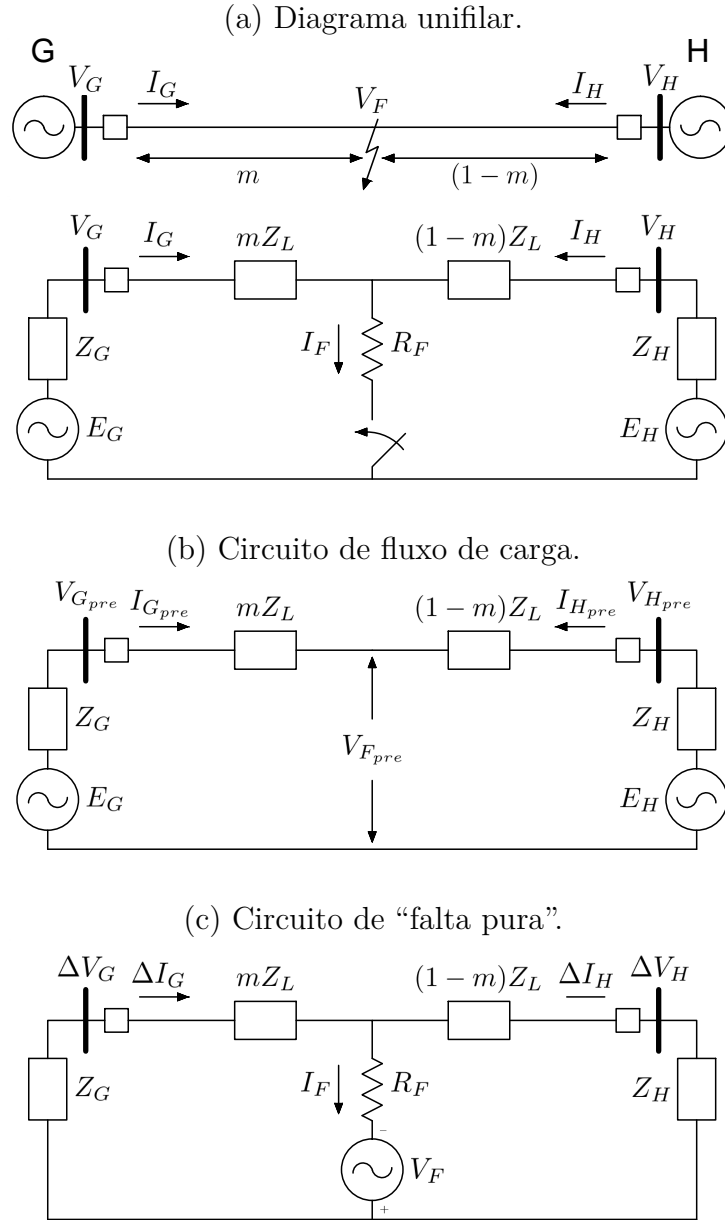
Os ABFs de um terminal realizam a estimativa do local da falta a partir da impedância calculada com os valores das tensões e das correntes medidas em um terminal da LT. A maioria desses algoritmos utilizam o *loop* de falta, de acordo com o tipo de falta, de forma análoga aos relés de proteção de distância (SAHA *et al.*, 2009). Serão abordados diferentes algoritmos que, neste trabalho, serão chamados de: *Reatância*, Wiszniewski (1983), Takagi *et al.* (1982), Takagi Modificado, Izykowski (2008) e Saha *et al.* (1999).

A Equação 2.1 apresenta o diagrama unifilar de uma falta trifásica. No modelo de *loop* de falta (2.1), a tensão do terminal G – V_G – é definida em função da localização de falta – m – e, ao dividi-la pela corrente do terminal G – I_G , tem-se a impedância vista pelo terminal G – Z_{FG} (2.2). A Figura 2 representa as duas parcelas que compõem (2.2): A primeira parcela – $m \cdot Z_L$ – representa uma fração, proporcional à distância da falta, da impedância da LT – Z_L ; A segunda parcela – $R_F \cdot I_F / I_G$ – está relacionada à resistência de falta – R_F – e terá um componente reativo, chamado de “efeito reatância”, se a corrente de falta – I_F – não estiver em fase com – I_G . Este trabalho apresenta os recursos utilizados pelos ABFs de um terminal para reduzir o impacto do “efeito reatância”.

$$V_G = m \cdot Z_L \cdot I_G + R_F \cdot I_F \quad (2.1)$$

$$Z_{FG} = \frac{V_G}{I_G} = m \cdot Z_L + R_F \frac{I_F}{I_G} \quad (2.2)$$

Figura 1 – Falta trifásica em uma LT com duas fontes: G e H.



Fonte: Autor.

A análise do “Efeito Reatância” pode ser realizada utilizando o Teorema da Superposição, separando o circuito da falta trifásica (Figura 1a) em dois circuitos equivalentes: Circuito de fluxo de carga (Figura 1b); Circuito de “falta pura” (Figura 1c). Para o cálculo da corrente de “falta pura” – ΔI_G , considera-se que a corrente do terminal G medida na pré-falta – $I_{G_{pre}}$ – seja igual à corrente de fluxo de carga durante a falta (2.3). A impedância vista (2.2) pode ser reescrita (2.6) em função do fator de carga n_G (2.4) e do fator de distribuição de corrente – d_G – (2.5) (IEEE Std C37.114™-2014, 2015).

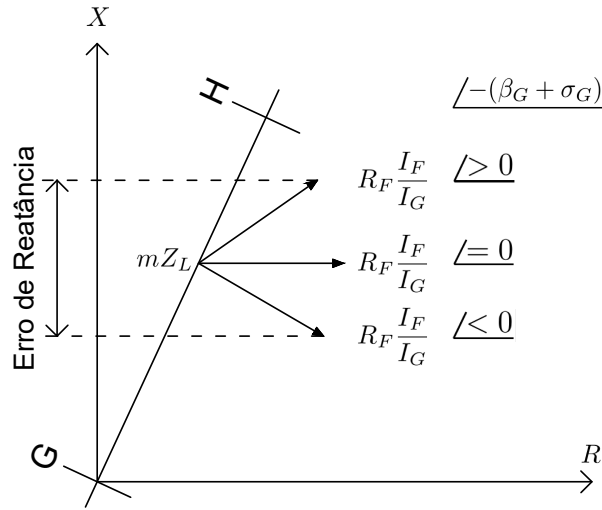
$$I_G = \Delta I_G + I_{Gpre} \quad (2.3)$$

$$(2.4)$$

$$d_G = \frac{\Delta I_G}{I_F} = \frac{Z_H + (1 - m)Z_L}{Z_H + Z_L + Z_G} = |d_G| / \beta_G \quad (2.5)$$

$$Z_{FG} = \frac{V_G}{I_G} = m \cdot Z_L + R_F \frac{1}{d_G \cdot n_G} \quad (2.6)$$

Figura 2 – Interpretação gráfica do erro devido ao “Efeito de Reatância”.



Fonte: Autor.

A componente reativa da segunda parcela de (2.6) é determinada pela soma dos ângulos σ_G e β_G dos fatores n_G (2.4) e d_G (2.5). O ângulo β_G se aproxima de zero em sistemas homogêneos, no qual as impedâncias do sistema e das LTs apresentam ângulos iguais. O ângulo σ_G tende a zero a medida que a magnitude da corrente de falta se torna consideravelmente maior que a corrente de carga (IEEE Std C37.114TM-2014, 2015). O “efeito reatância” é, portanto, causado pela resistência de falta, combinada com a corrente de carga e não homogeneidade do sistema.

Os valores de V_G e I_G podem ser dispostos de tal forma que, para cada tipo de falta, a impedância vista no *loop* de falta corresponda à impedância da sequência positiva, considerando que a LT seja simétrica e perfeitamente transposta (ZIEGLER, 2011). O Quadro 1 mostra a composição dos sinais de corrente e de tensão I_G , ΔI_G e V_G para os diferentes tipos de faltas. O fator de compensação de sequência zero – K_0 – utilizado nessa formulação está definido em (2.7).

$$K_0 = \frac{Z_{0L} - Z_{1L}}{Z_{1L}} \quad (2.7)$$

Quadro 1 – Composição dos sinais de corrente e de tensão para os diferentes tipos de faltas.

| Tipo de Falta | V_G | I_G | ΔI_G |
|-------------------|---------------------|------------------------------|------------------------|
| AT | $V_{G,A}$ | $I_{G,A} + K_0 \cdot I_{0G}$ | $I_{G,A} - I_{Gpre,A}$ |
| BT | $V_{G,B}$ | $I_{G,B} + K_0 \cdot I_{0G}$ | $I_{G,B} - I_{Gpre,B}$ |
| CT | $V_{G,C}$ | $I_{G,C} + K_0 \cdot I_{0G}$ | $I_{G,C} - I_{Gpre,C}$ |
| ABC,AB,ABT | $V_{G,A} - V_{G,B}$ | $I_{G,A} - I_{G,B}$ | $I_G - I_{Gpre}$ |
| BC,BCT | $V_{G,B} - V_{G,C}$ | $I_{G,B} - I_{G,C}$ | $I_G - I_{Gpre}$ |
| CA,CAT | $V_{G,C} - V_{G,A}$ | $I_{G,C} - I_{G,A}$ | $I_G - I_{Gpre}$ |

Fonte: Saha *et al.* (2009).

O fator de distribuição de corrente, calculado em (2.5), não considera a presença de uma ligação equivalente extra entre as barras G e H, que é comum ao calcular o equivalente de *Thévenin* de um sistema com ligações em anel. Para considerar essa ligação equivalente entre barras, será aplicada a abordagem de cálculo desse fator apresentada por Saha *et al.* (2009). A partir da análise dos circuitos apresentados na Figura 3 e considerando que as impedâncias de rede de sequências positiva e negativa são basicamente idênticas, obtêm-se os fatores de distribuição da corrente de falta descritos nas Equações 2.9 e 2.10 em função dos coeficientes complexos definidos no Quadro 2 para sequência positiva. Os coeficientes das impedâncias de sequência zero têm formas análogas aos de sequência positiva, bastando substituir as impedâncias de sequência positiva pelas respectivas impedâncias de sequência zero. As componentes simétricas da corrente de falta – I_F – podem ser determinadas com o uso dos fatores de distribuição de corrente de falta, conforme apresentado em (2.8).

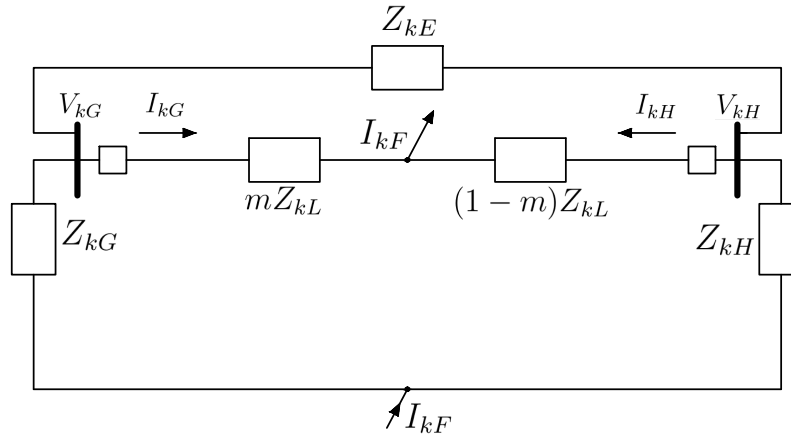
$$I_{F1} = \frac{\Delta I_{G1}}{d_{G1}}; \quad I_{F2} = \frac{\Delta I_{G2}}{d_{G2}}; \quad I_{F0} = \frac{\Delta I_{G0}}{d_{G0}} \quad (2.8)$$

Os ABFs de um terminal utilizam os fatores de distribuição de corrente de falta, para compensar a não homogeneidade do sistema. O cálculo desse ângulo leva em consideração a distância até a falta – m . Uma estimativa preliminar de distância é calculada considerando $d_G = 1$. O resultado é usado para calcular os fatores de distribuição de corrente que, então, são utilizados para determinação da estimativa final.

$$d_1 = d_2 = \frac{m \cdot K_1 + L_1}{M_1} \quad (2.9)$$

$$d_0 = \frac{K_0 m + L_0}{M_0} \quad (2.10)$$

Figura 3 – Diagrama de circuito equivalente de uma LT de circuito simples e ligação equivalente extra entre os terminais G e H.



Fonte: Autor.

Quadro 2 – Coeficientes complexos usados para determinar o fator de distribuição de corrente para seqüências positiva e negativa.

| Ligação equivalente extra entre as barras G e H | Coeficientes |
|---|---|
| Com a ligação equivalente extra | $K_1 = -Z_{1L}Z_{1E} - (Z_{1G} + Z_{1H})Z_{1L}$ $L_1 = Z_{1L}(Z_{1G} + Z_{1H}) + Z_{1E}(Z_{1L} + Z_{1H})$ $M_1 = (Z_{1G} + Z_{1H})(Z_{1E} + Z_{1L}) + Z_{1L}Z_{1E}$ |
| Sem a ligação equivalente extra | $K_1 = -Z_{1L}$ $L_1 = Z_{1L} + Z_{1H}$ $M_1 = Z_{1G} + Z_{1H} + Z_{1L}$ |

Fonte: Saha *et al.* (2009).

2.2.1 Algoritmo da Reatância

O algoritmo da Reatância mede a impedância aparente de forma análoga à proteção de distância. Em seguida, determina a razão entre a reatância medida e a reatância total da LT. Essa razão é proporcional à distância da falta. O algoritmo da reatância é um dos primeiros algoritmos que compensa a resistência de falta medindo apenas a parte imaginária da impedância vista pelo terminal ([IEEE Std C37.114™-2014, 2015](#)). Entretanto, o desempenho desse algoritmo é afetado “pela contribuição do terminal remoto, pela corrente de carga, e pelos ângulos da impedância de linha e do sistema ([SCHWEITZER, 1983](#))”.

A estimativa de localização de faltas – m – (2.11) utilizada no algoritmo da Reatância Simples é obtida pela razão entre a reatância medida – $\Im\{Z_{FG}\}$ – (2.2) e a reatância total de seqüência positiva da LT – $\Im\{Z_{1L}\}$. A eliminação da parcela referente à R_F , ao resolver as componentes imaginárias de (2.2), ocorre apenas se I_F e I_G estiverem em

fase (IEEE Std C37.114TM-2014, 2015). O desempenho de algoritmo é, portanto, impactado pelo “efeito reatância”.

$$m = \frac{\Im\{Z_{FG}\}}{\Im\{Z_{1L}\}} \quad (2.11)$$

2.2.2 Wiszniewski (1983)

O algoritmo de localização de faltas desenvolvido por Wiszniewski (1983) também está relacionado à técnica da proteção de distância e, ao contrário do algoritmo da reatância, considera tanto a reatância, quanto a resistência vista pelo terminal (SAHA *et al.*, 2009). Esse algoritmo propõe corrigir o erro referente à resistência de falta, apresentando bom desempenho mesmo nos casos em que seja elevada (WISZNIEWSKI, 1983).

A decomposição de (2.2) em suas componentes reais e imaginárias forma um sistema subdeterminado com quatro incógnitas m , R_F , $\Re\{I_F/I_G\}$ e $\Im\{I_F/I_G\}$. Sendo que \Re e \Im representam a componente real e imaginária, respectivamente. A solução proposta por Wiszniewski (1983) consiste em substituir I_F de (2.2) por (2.5), assumindo que a corrente medida na pré-falta seja igual à corrente de fluxo de carga durante a falta. Dessa forma, é possível obter expressões para a resistência – R_{FG} – e reatância – X_{FG} – (2.12) vistas pelo terminal, em função das incógnitas m e R_F .

$$\begin{cases} R_{FG} = m \cdot R_L + \frac{R_F}{|d_G|} \cdot \Re\left\{\frac{\Delta I_B}{I_B \cdot e^{j\beta_G}}\right\} \\ X_{FG} = m \cdot X_L + \frac{R_F}{|d_G|} \cdot \Im\left\{\frac{\Delta I_B}{I_B \cdot e^{j\beta_G}}\right\} \end{cases} \quad (2.12)$$

O sistema de equações (2.12) pode ser reescrito em termos das componentes a , b e do ângulo ϕ da impedância Z_{1L} (2.13).

$$a = \Re\left\{\frac{\Delta I_B}{I_B \cdot e^{j\beta_G}}\right\}; \quad b = \Im\left\{\frac{\Delta I_B}{I_B \cdot e^{j\beta_G}}\right\}; \quad \phi = \arctan \frac{X_L}{R_L} \quad (2.13)$$

A estimativa da localização de falta m (2.14), utilizada no algoritmo Wiszniewski (1983), é obtida com a solução de (2.12), utilizando a , b e ϕ (2.13). Para faltas monofásicas, utiliza-se $d_G = (2d_{1G} + d_{0G})/3$ e, para os demais casos, $d_G = d_{1G}$.

$$m = \frac{X_{FG}}{X_L} - \frac{R_{FG} \cdot \tan\phi - X_{FG}}{X_L \cdot ((a/b) \cdot \tan\phi - 1)} \quad (2.14)$$

2.2.3 Takagi *et al.* (1982)

Takagi *et al.* (1982) propõe outra solução para redução do impacto da resistência de falta na estimativa de localização. Ao decompor (2.1) em suas partes reais e imaginárias, tem-se um sistema subdeterminado com quatro incógnitas m , R_F , $\Re\{I_F\}$ e $\Im\{I_F\}$. Takagi *et al.* (1982) propuseram uma solução separando o circuito da falta (Figura 1a) em um

circuito de “pré-falta” (Figura 1b) e um circuito de “falta pura” (Figura 1c), assumindo que a corrente medida na pré-falta seja igual à corrente de fluxo de carga durante a falta.

Os autores iniciaram a derivação da localização da falta considerando o modelo de linha de parâmetros distribuídos. No entanto, eles introduziram algumas simplificações, que correspondem ao uso do modelo de linha de parâmetros concentrados (SAHA *et al.*, 2009). Para simplificar a apresentação desse algoritmo, o modelo de linha de parâmetros concentrados será utilizado desde o início da formulação. Ao substituir I_F de (2.1) por (2.5), obtém-se a equação (2.15).

$$V_G = m \cdot Z_{1L} \cdot I_G + R_F \frac{\Delta I_G}{|d_G| \cdot e^{j\beta_G}} \quad (2.15)$$

A eliminação da parcela referente à R_F de (2.15) é alcançada ao multiplicá-la por $\Delta I_G^* e^{j\beta_{1G}}$ e, então, resolver a componente imaginária, obtendo a expressão para m (2.16).

$$m = \frac{\Im\{V_G \cdot \Delta I_G^* \cdot e^{j\beta_{1G}}\}}{\Im\{Z_{1L} \cdot I_G \cdot \Delta I_G^* \cdot e^{j\beta_{1G}}\}} \quad (2.16)$$

A estimativa da localização de falta – m – (2.17), utilizada no algoritmo Takagi *et al.* (1982), é obtida a partir de (2.16), considerando o sistema homogêneo $\beta_G = 0$.

$$m = \frac{\Im\{V_G \cdot \Delta I_G^*\}}{\Im\{Z_{1L} \cdot I_G \cdot \Delta I_G^*\}} \quad (2.17)$$

2.2.4 Takagi Modificado

Schweitzer (1983), Zimmerman e Costello (2006) e o guia IEEE Std C37.114TM-2014 (2015) apresentam modificações no algoritmo proposto por Takagi *et al.* (1982) para aprimorar o seu desempenho, utilizando o ângulo β_G , para considerar a não homogeneidade do sistema, e substituindo ΔI_G pela corrente residual $-3I_{0G}$ – (2.18), para evitar o uso de I_{Gpre} nos casos de faltas monofásicas.

$$m = \frac{\Im\{V_G \cdot I_{0G}^* \cdot e^{j\beta_{0G}}\}}{\Im\{Z_{1L} \cdot I_G \cdot I_{0G}^* \cdot e^{j\beta_{0G}}\}} \quad (2.18)$$

Para faltas monofásicas, utiliza-se (2.18) e o fator d_{0G} e, para os demais casos, utiliza-se (2.16) e o fator d_{1G} .

2.2.5 Izykowski (2008)

O modelo de *loop* de falta apresentado em (2.1) pode ser expresso em termos das componentes simétricas das tensões e correntes, conforme apresentado em (2.19).

$$V_G = m \cdot Z_L \cdot I_G + R_F \cdot I_F \quad (2.19)$$

Onde,

$$\begin{aligned} V_G &= a_1 V_{1G} + a_2 V_{2G} + a_0 V_{0G} \\ I_G &= a_1 I_{1G} + a_2 I_{2G} + a_0 \frac{Z_{0L}}{Z_{1L}} I_{0G} \\ I_F &= a_{0F} I_{0F} + a_{1F} I_{1F} + a_{2F} I_{2F} \end{aligned}$$

Ao decompor (2.19) em suas partes reais e imaginárias, tem-se um sistema subdeterminado com quatro incógnitas m , R_F , $\Re\{I_F\}$ e $\Im\{I_F\}$. A solução adotada é análoga à descrita na subseção 2.2.3. Ao substituir I_{F0} , I_{F1} e I_{F2} de (2.19) por (2.8), obtém-se a equação (2.20).

$$V_G = m \cdot Z_L \cdot I_G + R_F \cdot \left(a_{0F} \cdot \frac{\Delta I_{G0}}{d_{G0}} + a_{1F} \cdot \frac{\Delta I_{G1}}{d_{G1}} + a_{2F} \frac{\Delta I_{G2}}{d_{G2}} \right) \cdot e^{-j\beta} \quad (2.20)$$

Ao considerar que corrente de sequência negativa na pré-falta é próxima de zero, que os fatores de distribuição de corrente de sequência positiva e negativa são iguais e que o conjunto de coeficientes de sequência zero – a_{0F} – para cálculo da corrente de falta, apresentados no Quadro 4, são iguais a zero, obtém-se (2.21).

$$V_G = m \cdot Z_L \cdot I_G + \frac{R_F}{|d_1|} \cdot (a_{1F} \cdot \Delta I_{1G} + a_{2F} \cdot I_{2G}) \cdot e^{-j\beta} \quad (2.21)$$

Os coeficientes – a_1 , a_2 , a_3 , a_{1F} , a_{2F} e a_{3F} – são mostrados no Quadro 3 e no Quadro 4. Os coeficientes para o cálculo da corrente de falta – a_{0F} , a_{1F} e a_{2F} – podem ser definidos de formas distintas, dependendo da prioridade atribuída às componentes de sequência. No Quadro 4, os coeficientes eliminam a utilização da sequência zero e priorizam a sequência negativa em detrimento da sequência positiva, reduzindo os erros associados ao fluxo de carga e ao acoplamento mútuo de sequência-zero de linhas paralelas.

A eliminação da parcela referente à R_F de (2.20) é alcançada ao multiplicá-la por $(a_{1F} \cdot \Delta I_{1G} + a_{2F} \cdot I_{2G})^* \cdot e^{j\beta}$ e, então, resolver a componente imaginária, obtendo a expressão para m (2.22).

$$m = \frac{\Im(V_G \cdot (a_{1F} \cdot \Delta I_{1G} + a_{2F} \cdot I_{2G})^* \cdot e^{j\beta G})}{\Im(Z_L \cdot I_G \cdot (a_{1F} \cdot \Delta I_{1G} + a_{2F} \cdot I_{2G})^* \cdot e^{j\beta G})} \quad (2.22)$$

Quadro 3 – Conjunto dos coeficientes de ponderação para cálculo das tensões e correntes dos terminais para cada tipo de falta.

| Tipo de Falta | a_1 | a_2 | a_0 |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| AN | 1 | 1 | 1 |
| BN | $-0.5 - j0.5\sqrt{3}$ | $-0.5 + j0.5\sqrt{3}$ | 1 |
| CN | $-0.5 + j0.5\sqrt{3}$ | $-0.5 - j0.5\sqrt{3}$ | 1 |
| AB, ABN, ABC, ABCN ¹ | $1.5 + j0.5\sqrt{3}$ | $1.5 - j0.5\sqrt{3}$ | 0 |
| BC, BCN | $-j\sqrt{3}$ | $j\sqrt{3}$ | 0 |
| CA, CAN | $-1.5 + j0.5\sqrt{3}$ | $-1.5 - j0.5\sqrt{3}$ | 0 |

Fonte: Saha *et al.* (2009).

Quadro 4 – Conjunto de coeficientes de ponderação para cálculo da corrente de falta com a eliminação da sequência zero e a priorização do uso da sequência negativa.

| Tipo de Falta | a_{1F} | a_{2F} | a_{0F} |
|-----------------------|----------------------|-----------------------------------|----------|
| AN | 0 | 3 | 0 |
| BN | 0 | $-1.5 + j1.5\sqrt{3}$ | 0 |
| CN | 0 | $-1.5 - j1.5\sqrt{3}$ | 0 |
| AB | 0 | $1.5 - j0.5\sqrt{3}$ | 0 |
| BC | 0 | $j\sqrt{3}$ | 0 |
| CA | 0 | $-1.5 - j0.5\sqrt{3}$ | 0 |
| ABN | $1.5 + j0.5\sqrt{3}$ | $1.5 - j0.5\sqrt{3}$ | 0 |
| BCN | $-j\sqrt{3}$ | $j\sqrt{3}$ | 0 |
| CAN | $1.5 - j0.5\sqrt{3}$ | $1.5 + j0.5\sqrt{3}$ | 0 |
| ABC, ABN ¹ | $1.5 + j0.5\sqrt{3}$ | $1.5 - j0.5\sqrt{3}$ ² | 0 |

Fonte: Saha *et al.* (2009).

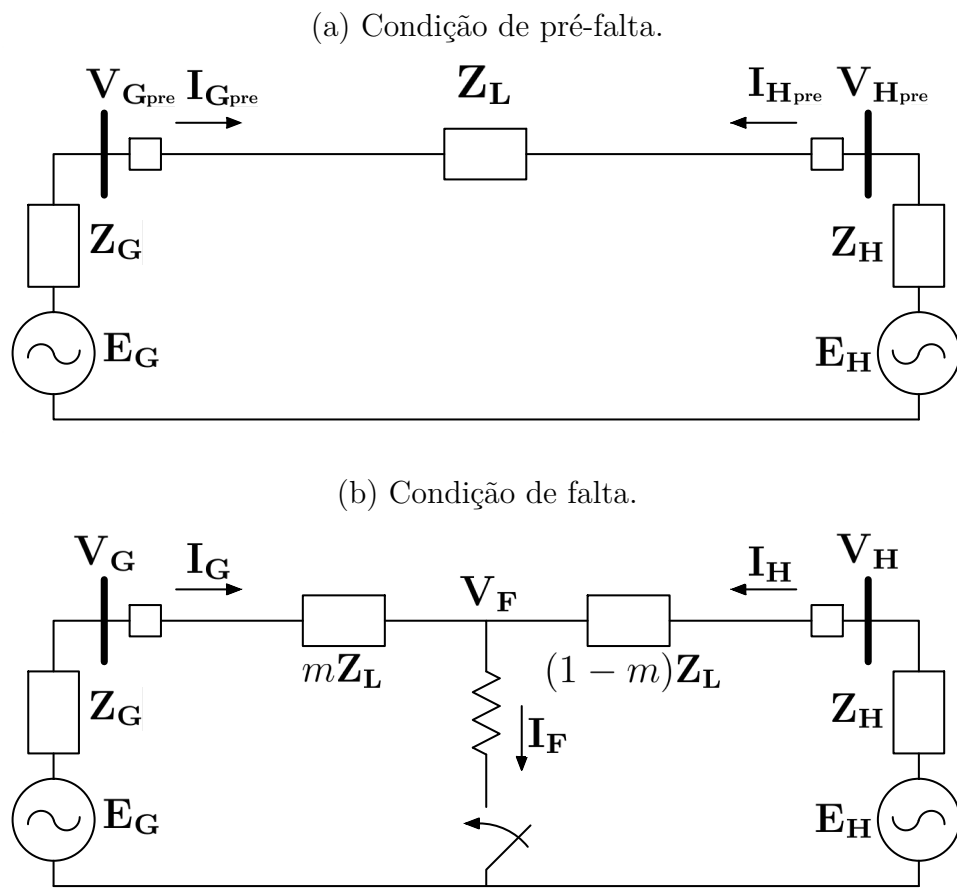
¹ O *loop* de falta entre fases AB é considerado, no entanto, os outros *loops* de falha BC e CA também podem ser utilizados

² Este coeficiente é diferente de zero; no entanto, a sequência negativa não está presente nos sinais.

2.2.6 Saha *et al.* (1999)

Os algoritmos apresentados: *Reatância*, *Wiszniewski* (1983), *Takagi et al.* (1982), *Takagi Modificado* e *Izykowski* (2008) utilizam abordagens de componentes simétricas, que podem ser efetivamente utilizadas para localizar faltas em linhas completamente simétricas. Entretanto, a simetria de uma LT pode ser comprometida nos casos de LTs com longos trechos sem transposição dos condutores. Algoritmos com abordagem matricial, que consideram a assimetria da LT, são apresentados em *Saha et al.* (1999), *Saha et al.* (2000), *Izykowski* (2008) e *Saha et al.* (2009).

Figura 4 – Diagrama unifilar de uma linha de transmissão com abordagem matricial.



Fonte: Autor.

A queda de tensão em um elemento trifásico (2.23), representada por uma matriz coluna de tensão trifásica – \mathbf{V} , pode ser expressa como o produto de uma matriz de impedância – \mathbf{Z} – e uma matriz coluna de corrente trifásica \mathbf{I} .

$$\mathbf{V} = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{I} \tag{2.23}$$

Onde,

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}; \mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}; \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{bmatrix}$$

Considerando o diagrama unifilar da [Figura 4](#), as matrizes coluna da tensão no ponto de falta – \mathbf{V}_F – e da corrente total de falta – \mathbf{I}_F – são determinadas em [\(2.24\)](#) e [\(2.25\)](#), respectivamente.

$$\mathbf{V}_F = \mathbf{V}_G - m \cdot \mathbf{Z}_L \cdot \mathbf{I}_G \tag{2.24}$$

$$\mathbf{I}_F = \mathbf{I}_G + \mathbf{I}_H \tag{2.25}$$

O modelo geral de falta utilizando a notação matricial [\(2.26\)](#) relaciona as matrizes coluna da corrente de falta – \mathbf{I}_F – e da tensão de falta – \mathbf{V}_F , por meio da resistência de falta – R_F – e da matriz de falta – \mathbf{K}_F – que está determinada no [Quadro 5](#) para os diferentes tipos de faltas.

$$\mathbf{I}_F = \frac{1}{R_F} \cdot \mathbf{K}_F \cdot \mathbf{V}_F \tag{2.26}$$

Quadro 5 – Determinação da matriz de faltas para os diferentes tipos de faltas.

| | | |
|--|--|--|
| AT | BT | CT |
| $\mathbf{K}_F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ | $\mathbf{K}_F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ | $\mathbf{K}_F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ |
| AB | BC | CA |
| $\mathbf{K}_F = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ | $\mathbf{K}_F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$ | $\mathbf{K}_F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ |
| ABT | BCT | CAT |
| $\mathbf{K}_F = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ | $\mathbf{K}_F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 2 \end{bmatrix}$ | $\mathbf{K}_F = \begin{bmatrix} 2 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 2 \end{bmatrix}$ |
| ABC | ABCT | |
| $\mathbf{K}_F = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$ | $\mathbf{K}_F = \begin{bmatrix} 3 & -1 & -1 \\ -1 & 3 & -1 \\ -1 & -1 & 3 \end{bmatrix}$ | |

Fonte: [Izykowski \(2008\)](#).

Ao relacionar o modelo geral de falta [\(2.26\)](#), a tensão de falta [\(2.24\)](#) e corrente de falta [\(2.25\)](#), obtém-se [\(2.27\)](#).

$$\frac{1}{R_F} \cdot \mathbf{K}_F \cdot (\mathbf{V}_G - m \cdot \mathbf{Z}_L \cdot \mathbf{I}_G) = \mathbf{I}_G + \mathbf{I}_H \quad (2.27)$$

Supondo que fontes de tensão não mudem devido à ocorrência da falta, a matriz coluna – $\Delta \mathbf{E}$ – pode ser expressa com base nas grandezas de pré-falta falta (2.28) e de falta (2.29), considerando as grandezas apresentadas na Figura 4a e na Figura 4b, respectivamente. A matriz coluna de corrente do terminal H – \mathbf{I}_H – (2.30) é definida a partir da matriz corrente do terminal G – \mathbf{I}_G – e das impedâncias da linha e do sistema ao relacionar (2.28) e (2.29).

$$\Delta \mathbf{E} = \mathbf{E}_G - \mathbf{E}_H = (\mathbf{Z}_G + \mathbf{Z}_H + \mathbf{Z}_L) \cdot \mathbf{I}_{G_{pre}} \quad (2.28)$$

$$\Delta \mathbf{E} = \mathbf{E}_G - \mathbf{E}_H = (\mathbf{Z}_G + m \cdot \mathbf{Z}_L) \cdot \mathbf{I}_G - [(1 - m) \cdot \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_H] \cdot \mathbf{I}_H \quad (2.29)$$

$$\mathbf{I}_H = ((1 - m) \cdot \mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_H)^{-1} \cdot ((\mathbf{Z}_G + m \cdot \mathbf{Z}_L) \cdot \mathbf{I}_G - (\mathbf{Z}_G + \mathbf{Z}_H + \mathbf{Z}_L) \cdot \mathbf{I}_{G_{pre}}) \quad (2.30)$$

Ao aplicar (2.30) em (2.27), obtém-se, após os arranjos necessários, a equação matricial (2.31).

$$\mathbf{A} \cdot m^2 + \mathbf{B} \cdot m + \mathbf{C} - \mathbf{D} \cdot R_F = 0 \quad (2.31)$$

Onde,

$$\mathbf{A} = \mathbf{Z}_L \cdot \mathbf{K}_F \cdot \mathbf{Z}_L \cdot \mathbf{I}_G$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{Z}_L \cdot \mathbf{K}_F \cdot (\mathbf{V}_S + \mathbf{Z}_L \cdot \mathbf{I}_G) + \mathbf{Z}_H \cdot \mathbf{K}_F \cdot \mathbf{Z}_L \cdot \mathbf{I}_G$$

$$\mathbf{C} = (\mathbf{Z}_L + \mathbf{Z}_H) \cdot \mathbf{K}_F \cdot \mathbf{V}_G$$

$$\mathbf{D} = (\mathbf{Z}_G + \mathbf{Z}_H + \mathbf{Z}_L) \cdot (\mathbf{I}_G - \mathbf{I}_{G_{pre}})$$

Ao transformar (2.31) para a forma escalar, obtém-se a seguinte fórmula quadrática para números complexos – A , B e C .

$$A \cdot m^2 + B \cdot m + C - R_F = 0 \quad (2.32)$$

Onde,

$$A = \mathbf{P}\mathbf{A}; \quad B = \mathbf{P}\mathbf{B}; \quad C = \mathbf{P}\mathbf{C}; \quad P = \frac{\mathbf{D}^T}{\mathbf{D}^T \mathbf{D}} \quad (2.33)$$

O sobrescrito T denota a transposição da matriz.

A equação quadrática escalar (2.32) pode ser resolvida em suas partes real – \Re – e imaginária – \Im , a partir das quais calcula-se a distância até a falta – m – e a resistência de falta – R_F , conforme apresentado em (2.34).

$$\begin{cases} \Re\{A\}m^2 + \Re\{B\}m + \Re\{C\} - R_F = 0 \\ \Im\{A\}m^2 + \Im\{B\}m + \Im\{C\} = 0 \end{cases} \quad (2.34)$$

2.3 Algoritmos de localização de faltas com base em fasores de dois terminais

Os ABFs de dois terminais permitem reduzir ou eliminar os erros relacionados à resistência de falta, à não homogeneidade do sistema e à corrente de carga. As amostras de tensão e de corrente dos terminais podem apresentar erros de sincronismo devido às diferenças de taxas de amostragem, aos deslocamentos de fase causados pelos transformadores de tensão e corrente, às falhas nos dispositivos de sincronização e outros. Os algoritmos apresentados a seguir apresentam soluções para correção dos possíveis erros de sincronismo entre os terminais da LT. Serão abordados diferentes algoritmos que, neste trabalho, serão chamados de: Saha *et al.* (2009), Izykowski *et al.* (2005), Izykowski *et al.* (2011), Girgis *et al.* (1992) e Johns e Jamali (1990).

A tensão no ponto da falta trifásica V_F da Figura 1 pode ser determinada a partir do terminal G e do terminal H, considerando um ângulo de sincronização δ entre os terminais, para correção dos possíveis erros de sincronismo na aquisição dos dados. A estimativa de falta m é obtida ao correlacionar essas equações, eliminando a influencia da R_F . Esse é o princípio da formulação dos ABFs de dois terminais analisados. A distinção entre eles está na formulação e nos requisitos necessários para sua implementação.

Essa abordagem pode ser estendida aos demais tipos de faltas com a aplicação do *Teorema de Fortescue*, equacionando a tensão no ponto da falta V_{kF} para uma componente simétrica de sequência $k = 0, 1, 2$. Em casos de faltas assimétricas, utiliza-se as grandezas de sequência negativa $k = 2$ e, para os casos de faltas simétricas, utiliza-se as grandezas de sequência positiva incremental $k = \Delta 1$, que consiste em subtrair os valores de tensão e corrente medidos na falta pelos valores de pré-falta. A utilização das grandezas de sequência negativa reduz os erros associados ao fluxo de carga e ao acoplamento mútuo de sequência-zero de linhas paralelas

2.3.1 Saha *et al.* (2009)

Saha *et al.* (2009) apresenta um algoritmo com as informações de tensão, corrente e impedância da LT, determinando V_{kF} a partir dos terminais G e H (2.35). O modelo

de parâmetros concentrados é utilizado, desconsiderando os elementos de derivação. A utilização das grandezas de falta de sequência negativa, para faltas assimétricas, elimina as dificuldades associadas ao fluxo de carga e aos efeitos de acoplamento mútuo de sequência-zero de linha paralela. A eliminação do operador de sincronização $-e^{j\delta}$ é realizada de forma algébrica com a utilização dos módulos das equações.

$$\begin{cases} V_{kF} = V_{kG} \cdot e^{j\delta} - m \cdot Z_{kL} \cdot I_{kG} \cdot e^{j\delta} \\ V_{kF} = V_{kH} - (1 - m) \cdot Z_{kL} \cdot I_{kH} \end{cases} \quad (2.35)$$

Ao relacionar as equações de V_{kF} (2.35) e, então, tomar o módulo, obtêm-se (2.36) que independe do ângulo δ .

$$1 = \frac{|V_{kH} - (1 - m) \cdot Z_{kL} \cdot I_{kH}|}{|V_{kG} - m \cdot Z_{kL} \cdot I_{kG}|} \quad (2.36)$$

A solução de (2.36) é uma função de segundo grau (2.37) com os coeficientes reais A_k , B_k e C_k definidos em função das tensões e das correntes dos terminais G e H V_{kG} , V_{kH} , I_{kG} , I_{kH} e Z_{kL} , para uma componente de sequência k .

$$A_k \cdot m^2 + B_k \cdot m + C_k = 0 \quad (2.37)$$

Onde,

$$\begin{aligned} A_k &= |Z_{kL} I_{kG}|^2 - |Z_{kL} I_{kH}|^2 \\ B_k &= -2\Re \{ V_{kG} (Z_{kL} I_{kG})^* + (V_{kH} - Z_{kL} I_{kH}) (Z_{kL} I_{kH})^* \} \\ C_k &= |V_{kG}|^2 - |V_{kH} - Z_{kL} I_{kH}|^2 \end{aligned}$$

A solução de (2.37) são dois valores de localização de falta m e apenas o valor entre 0 a 1 deve ser selecionado.

2.3.2 Izykowski *et al.* (2005)

Izykowski *et al.* (2005) propõe uma forma não interativa para determinação de δ baseado no modelo de LT de parâmetros concentrados, desconsiderando os elementos em derivação. Esse ângulo é utilizado para corrigir o erro de sincronismo e realizar o cálculo da distância de falta. Ao resolver (2.35), obtêm-se uma equação para cálculo da distância de falta $-m - (2.38)$ em função de $e^{j\delta}$.

$$m = \left| \frac{V_{kG} \cdot e^{j\delta} - V_{kH} + Z_{kL} \cdot I_{kH}}{Z_{kL} \cdot I_{kG} \cdot e^{j\delta} + Z_{kL} \cdot I_{kH}} \right| \quad (2.38)$$

O valor de δ (2.39) é obtido ao decompor as componentes reais e imaginárias de (2.35).

$$\delta = \text{sen}^{-1}\left(\frac{N_3}{\sqrt{N_1^2 + N_2^2}}\right) - \text{sen}^{-1}\left(\frac{N_1}{\sqrt{N_1^2 + N_2^2}}\right) \quad (2.39)$$

Onde,

$$N_1 = \Im \{Z_{kL}^*((V_{kH} - Z_{kL}I_{kH}) \cdot I_{kG}^* - V_{kG} \cdot I_{kH}^*)\}$$

$$N_2 = \Re \{-Z_{kL}^*((V_{kH} - Z_{kL}I_{kH}) \cdot I_{kG}^* + V_{kG} \cdot I_{kH}^*)\}$$

$$N_3 = \Im \{-Z_{kL}^*((V_{kH} - Z_{kL}I_{kH}) \cdot I_{kH}^* - V_{kG} \cdot I_{kG}^*)\}$$

Normalmente, apenas uma solução de δ é próxima de zero e é, portanto, selecionada.

2.3.3 Izykowski *et al.* (2011)

Izykowski *et al.* (2011) apresentam um ABF de dois terminais utilizando o modelo de LT de parâmetros distribuídos e que utiliza sinais não sincronizados de tensão e de corrente. Um operador de sincronização $e^{j\delta}$ é calculado de forma não interativa a partir do uso simultâneo de duas componentes simétricas.

A Figura 5 apresenta os diagramas de circuitos equivalentes de componentes simétricas da LT com falta com a abordagem de parâmetros distribuídos. A tensão no ponto de falta – V_{kF} – pode ser determinada a partir do comprimento da LT – l , dos valores de tensão e corrente dos terminais G e H, da constante de propagação da LT – γ_k – e da impedância de surto – Z_{kC} , para uma componente de sequência k (2.40).

$$\begin{cases} V_{kF} = V_{kG} \cdot e^{j\delta} \cdot \cosh(\gamma_k \cdot m \cdot l) - Z_{kC} \cdot I_{kG} \cdot e^{j\delta} \cdot \sinh(\gamma_k \cdot m \cdot l) \\ V_{kF} = V_{kH} \cdot \cosh(\gamma_k(1-m)l) - Z_{kC} \cdot I_{kH} \cdot \sinh(\gamma_k(1-m)l) \end{cases} \quad (2.40)$$

A distância da falta m (2.41), em função de $e^{j\delta}$, é obtida ao resolver (2.40).

$$m = \frac{\tanh^{-1}\left(\frac{V_{kH} \cdot \cosh(\gamma_k l) - Z_{kC} \cdot I_{kH} \cdot \sinh(\gamma_k l) - V_{kG} \cdot e^{j\delta}}{V_{kH} \cdot \sinh(\gamma_k l) - Z_{kC} \cdot I_{kH} \cdot \cosh(\gamma_k l) - Z_{kC} \cdot I_{kG} \cdot e^{j\delta}}\right)}{l \cdot \gamma_k} \quad (2.41)$$

A expressão para cálculo do operador de sincronização $e^{j\delta}$ (2.42) é obtida ao resolver (2.40).

$$A \cdot (e^{j\delta})^2 + B \cdot e^{j\delta} + C = 0 \quad (2.42)$$

Onde,

$$A = G_k S_m - G_m S_k$$

$$B = G_k T_m - H_k S_m - G_m T_k - H_k S_m$$

$$C = H_m T_k - H_k T_m$$

$$G_x = V_{xG}$$

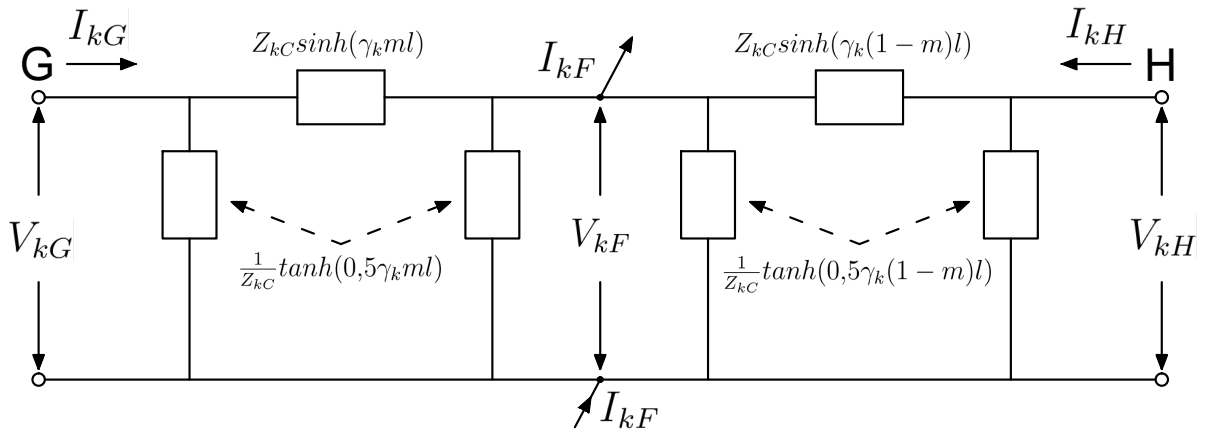
$$H_x = Z_{1C} \sinh(\gamma_1 l) I_{xH} - \cosh(\gamma_1 l) V_{xH}$$

$$S_x = -Z_{1C} I_{xG}$$

$$T_x = \sinh(\gamma_1 l) V_{xH} - Z_{1C} \cosh(\gamma_1 l) V_{xH}$$

Os coeficientes A , B , C são definidos em função de, V_{kG} , I_{kG} , V_{kH} , I_{kH} , γ_k , Z_{kC} e l , utilizando duas componentes simétricas: em faltas assimétricas, $k = \Delta 1$ e $m = 2$; em faltas simétricas, $k = \Delta 1$ e $m = 1$. O índice x deve ser substituído por k e por m .

Figura 5 – Diagrama do circuito das componentes simétricas da LT com abordagem de parâmetros distribuídos.



Fonte: Autor.

2.3.4 Girgis *et al.* (1992)

Girgis *et al.* (1992) apresenta um ABF, que utiliza uma abordagem matricial. O algoritmo permite considerar as seções de linha sem transposição sendo, portanto, aplicável à LTs transpostas por seguimento. Girgis *et al.* (1992) também apresenta um algoritmo iterativo para eliminar o erro de sincronização e outro algoritmo para linha de três terminais, entretanto não serão utilizados nesse trabalho. Será utilizado o operador de sincronização $-e^{j\delta}$ – definido em (2.39) na subseção 2.3.2, para sincronização dos sinais de tensão e corrente entre os terminais.

Considerando o sistema representado pela Figura 4, a tensão trifásica nos barramentos G e H pode ser representada em termos das correntes trifásicas e da matriz de impedância da LT como mostrado em (2.43). Ao eliminar \mathbf{V}_F , resulta em (2.44), que pode ser reescrita como (2.45), utilizando (2.46) e (2.47).

$$\begin{cases} \mathbf{V}_F = \mathbf{V}_G - m \cdot \mathbf{Z}_L \cdot \mathbf{I}_G \\ \mathbf{V}_F = \mathbf{V}_H - (1 - m) \cdot \mathbf{Z}_L \cdot \mathbf{I}_H \end{cases} \quad (2.43)$$

$$\mathbf{V}_G - \mathbf{V}_H + \mathbf{Z}_L \cdot \mathbf{I}_H = m \cdot \mathbf{Z}_L \cdot (\mathbf{I}_G + \mathbf{I}_H) \quad (2.44)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{M} \cdot m \quad (2.45)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{V}_G - \mathbf{V}_H + \mathbf{Z}_L \cdot \mathbf{I}_H \quad (2.46)$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{Z}_L \cdot (\mathbf{I}_G + \mathbf{I}_H) \quad (2.47)$$

A solução para m pode ser obtida usando a estimativa de mínimos quadrados como mostrado em (2.48), sendo que, \mathbf{M}^+ é a transposta conjugada de \mathbf{M} . A estimativa de localização de falta m (2.48) é independente do tipo da falta e da Resistência de Falta.

$$m = (\mathbf{M}^+ \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^+ \mathbf{Y} \quad (2.48)$$

Caso a linha de transmissão seja transposta por seguimento, (2.43) pode ser reescrita conforme (2.49):

$$\begin{cases} \mathbf{V}_F = \mathbf{V}_G - m \cdot \mathbf{Z}_{LG} \cdot \mathbf{I}_G \\ \mathbf{V}_F = \mathbf{V}_H - (1 - m) \cdot \mathbf{Z}_{LH} \cdot \mathbf{I}_H \end{cases} \quad (2.49)$$

As matrizes \mathbf{Z}_{LG} e \mathbf{Z}_{LH} são as matrizes de impedância da linha de transmissão do ponto da falta até o terminal G e o terminal H, respectivamente, considerando cada trecho de transposição da LT. Uma estimativa inicial de m é realizada, utilizando (2.48), (2.46) e (2.47), para definição dessas matrizes.

Ao resolver (2.49), obtêm-se (2.50), que pode ser reescrita como (2.45), utilizando (2.51) e (2.52). A solução para m pode ser obtida usando a estimativa de mínimos quadrados como mostrado em (2.48).

$$\mathbf{V}_G - \mathbf{V}_H + \mathbf{Z}_{LH} \cdot \mathbf{I}_H = m \cdot [\mathbf{Z}_{LG} \cdot \mathbf{I}_G + \mathbf{Z}_{LH} \cdot \mathbf{I}_H] \quad (2.50)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{V}_G - \mathbf{V}_H + \mathbf{L} \cdot \mathbf{Z}_{LH} \cdot \mathbf{I}_H \quad (2.51)$$

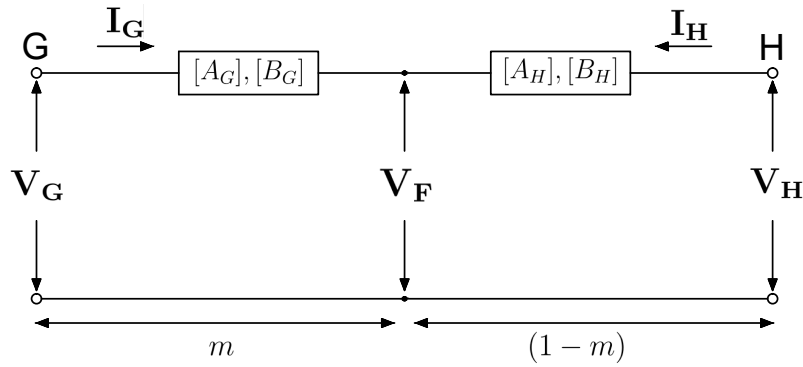
$$\mathbf{M} = \mathbf{Z}_{LG} \cdot \mathbf{I}_G + \mathbf{Z}_{LH} \cdot \mathbf{I}_H \quad (2.52)$$

2.3.5 Johns e Jamali (1990)

Johns e Jamali (1990) apresentam um algoritmo para cálculo de distância de faltas a partir das matrizes de impedância – \mathbf{Z}_L – e admitância – \mathbf{Y}_L – da LT. As equações da rede trifásica são desacopladas em redes monofásicas independentes usando a teoria dos modos naturais e a teoria das funções matriciais. Esse algoritmo independe da resistência de falta, do tipo de falta e apresenta alta precisão para linhas não transpostas e longas (JOHNS; JAMALI, 1990).

Uma linha de transmissão trifásica de circuito simples é representada na Figura 6. O equivalente trifásico de (2.40) é escrito em (2.53). A abordagem realizada na subseção 2.3.3 pode ser estendida para linhas de transmissão não transpostas pelo desacoplamento de (2.53), usando a teoria dos modos naturais e a teoria das funções matriciais (JOHNS; JAMALI, 1990).

Figura 6 – Diagrama unifilar de uma LT com abordagem de matriz de duas portas.



Fonte: Autor.

$$\begin{cases} \mathbf{V}_F = [\mathbf{A}_G]\mathbf{V}_G - [\mathbf{B}_G]\mathbf{I}_G \\ \mathbf{V}_F = [\mathbf{A}_H]\mathbf{V}_H - [\mathbf{B}_H]\mathbf{I}_H \end{cases} \quad (2.53)$$

A aplicação da transformação em grandezas modais decompõe a LT trifásica em vários modelos monofásicos desacoplados em que as tensões e as correntes são definidas em (2.54) e (2.55). Para cada componente modal $M = 1, 2, 3$, existe um par de equações equivalente a (2.56). A estimativa de localização de faltas – m – é definida em (2.57). Nesse trabalho, foi utilizado o modo 2 para faltas envolvendo terra e o modo 3 para os demais casos.

$$\mathbf{V}_{M(1,2,3)G} = [\mathbf{Q}]^{-1}\mathbf{V}_G \quad (2.54)$$

$$\mathbf{I}_{M(1,2,3)H} = [\mathbf{S}]^{-1}\mathbf{I}_G \quad (2.55)$$

Onde:

$[\mathbf{Q}]$ é a matriz de autovetores de $[\mathbf{Z}][\mathbf{Y}]$

$[\mathbf{S}]$ é a matriz de autovetores de $[\mathbf{Y}][\mathbf{Z}]$

$$\begin{cases} V_{MF} = A_{MG}V_{MG} - B_{MG}I_{MG} \\ V_{MF} = A_{MH}V_{MH} - B_{MH}I_{MH} \end{cases} \quad (2.56)$$

$$m = \frac{\tanh^{-1}\left(\frac{-B_M}{A_M}\right)}{l\gamma_M} \quad (2.57)$$

Onde,

$$A_M = Z_{Mc} \cdot \cosh(\gamma_M \cdot l) \cdot I_{MH} - \sinh(\gamma_M \cdot l) \cdot V_{MH} + Z_{Mc} \cdot I_{MG}$$

$$B_M = \cosh(\gamma_M) \cdot V_{MH} - Z_{Mc} \cdot \sinh(\gamma_M \cdot l) \cdot I_{MH} - V_{MG}$$

As impedâncias de surto modal podem ser determinadas a partir da fórmula $[Z_{Mc}] = [\gamma_M]^{-1}[Q]^{-1}[Z][S]$, onde $[\gamma_M]$ é uma matriz diagonal das constantes de propagação modal, sendo a raiz quadrada dos autovalores do produto da matriz $[Z][Y]$. A matriz $[Z_{Mc}]$ assume a forma diagonal de $[Z_{01} \ Z_{02} \ Z_{03}]$ para uma linha trifásica, sendo os valores individuais as impedâncias de surto modal (JOHNS; JAMALI, 1990).

2.4 Considerações finais

O algoritmo da [Reatância](#) apresenta uma formulação simples com menos requisitos de dados de entrada e parâmetros. Entretanto, esse algoritmo pode ter resultados imprecisos devido ao “efeito reatância” causado pela resistência de falta, combinada com a corrente de carga e a não homogeneidade do sistema. Foram apresentados diversos ABFs de um terminal com recursos para reduzir os erros devido ao “efeito reatância” e aprimorar a estimativa de localização.

[Wiszniewski \(1983\)](#) considera tanto a reatância quanto a resistência, vistas pelo terminal, e utiliza, também, o fator de distribuição de corrente para eliminação do “efeito reatância”. [Takagi et al. \(1982\)](#) considera a corrente de pré-falta para reduzir o impacto da corrente de carga, mas considera o sistema elétrico homogêneo. O algoritmo [Takagi Modificado](#) utiliza a corrente de sequência zero para evitar o uso da corrente de pré-falta nos casos de faltas monofásicas. O algoritmo [Izykowski \(2008\)](#) prioriza a componente de sequência negativa em detrimento da sequência zero e positiva, reduzindo os erros associados ao fluxo de carga e ao acoplamento mútuo de sequência-zero de linhas paralelas.

Os algoritmos [Wiszniewski \(1983\)](#), [Takagi Modificado](#), [Izykowski \(2008\)](#) e [Saha et al. \(1999\)](#) consideram a não homogeneidade do sistema utilizando as informações das impedâncias do sistema elétrico. O algoritmo [Saha et al. \(1999\)](#) apresenta uma abordagem matricial, sendo aplicável à LTs não transpostas.

Os ABF de dois terminais eliminam os erros associados à resistência de falta. Os algoritmos [Saha et al. \(2009\)](#) e [Izykowski et al. \(2005\)](#) utilizam o modelo de parâmetros concentrados da LT e desconsideram os elementos de derivação. O algoritmo [Izykowski et al. \(2011\)](#) considera o modelo de LT de parâmetros distribuídos que é mais apropriado para aplicações em LTs longas. Esses algoritmos utilizam as componentes de sequência negativa nos casos de faltas assimétricas para eliminar os erros associados ao fluxo de carga e ao acoplamento mútuo de sequência-zero de linhas paralelas.

O algoritmo [Saha et al. \(2009\)](#) contorna o erro de sincronismo com operações algébricas, para eliminar o operador de sincronização. Os algoritmos [Izykowski et al. \(2005\)](#) e [Izykowski et al. \(2011\)](#) apresentam recursos para calcular o operador de sincronização, para corrigir possíveis erros de sincronização.

Os algoritmos [Girgis et al. \(1992\)](#) e [Johns e Jamali \(1990\)](#) utilizam abordagem matricial sendo aplicáveis à LTs não transpostas. [Girgis et al. \(1992\)](#) considera apenas as impedâncias da LT, enquanto que [Johns e Jamali \(1990\)](#) considera, também, as admitâncias. Nesse trabalho o algoritmo [Girgis et al. \(1992\)](#) foi modificado para considerar os casos de LTs com longos trechos sem transposição.

A aplicação de um determinado ABF depende do cenário da falta, da disponibilidade dos dados de entrada e dos requisitos de parâmetros. O [Quadro 6](#) apresenta o resumo

desses requisitos, para os ABFs apresentados e que serão aplicados nos capítulos seguintes.

Quadro 6 – Resumo dos requisitos dos ABFs.

| | ABFs de Um Terminal | | | | | | ABFs de Dois Term. | | | | |
|------------------------------|--|--|--|--|--|-------------------------------------|--|--|--|--|--|
| Parâmetros | Reatância | Wiszniewski (1983) | Takagi <i>et al.</i> (1982) | Takagi Modificado | Izykowski (2008) | Saha <i>et al.</i> (1999) | Saha <i>et al.</i> (2009) | Izykowski <i>et al.</i> (2005) | Izykowski <i>et al.</i> (2011) | Girgis <i>et al.</i> (1992) | Johns e Jamali (1990) |
| Dados da Falta | | | | | | | | | | | |
| $Tipo$ | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> ⁴ | <input checked="" type="checkbox"/> ⁴ | <input checked="" type="checkbox"/> ⁴ | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| V_G | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| I_G | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| V_H | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| I_H | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| V_{Gpre} | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> ⁴ | <input checked="" type="checkbox"/> ⁴ | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| I_{Gpre} | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> ² | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> ⁴ | <input checked="" type="checkbox"/> ⁴ | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| V_{Hpre} | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> ⁴ | <input checked="" type="checkbox"/> ⁴ | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| I_{Hpre} | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> ⁴ | <input checked="" type="checkbox"/> ⁴ | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| m_{pre} | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> ⁶ | <input checked="" type="checkbox"/> ⁶ |
| δ | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> ⁷ | <input checked="" type="checkbox"/> ⁷ |
| Parâmetros da LT | | | | | | | | | | | |
| Z_{0L} | <input checked="" type="checkbox"/> ¹ | <input checked="" type="checkbox"/> ¹ | <input checked="" type="checkbox"/> ¹ | <input checked="" type="checkbox"/> ¹ | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Z_{1L} | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> ⁴ | <input checked="" type="checkbox"/> ⁴ | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| γ_1 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Z_{1C} | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| l | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Z_L | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Y_L | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| Parâmetros do Sistema | | | | | | | | | | | |
| Z_{0G} | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Z_{1G} | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Z_{0H} | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Z_{1H} | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Z_{0P} | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> ³ | <input checked="" type="checkbox"/> ³ | <input checked="" type="checkbox"/> ³ | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Z_{1P} | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> ³ | <input checked="" type="checkbox"/> ³ | <input checked="" type="checkbox"/> ³ | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Fonte: Autor.

¹ Apenas em casos de faltas monofásicas.
² Apenas nos casos de faltas bifásicas e trifásicas.
³ Parâmetro opcional.
⁴ Apenas nos casos de faltas trifásicas.

3 Modelagem e Implementações

3.1 Considerações Iniciais

Os algoritmos estudados serão aplicados em casos de faltas em LTs de EAT simuladas no *software* ATPDRAW™, para avaliar a sensibilidade às diversas fontes de erro. As LTs serão inseridas em diferentes sistemas: Sistema Homogêneo, Sistema não Homogêneo e Sistema Elétrico Real. Os modelos serão usados para simular faltas nas LTs e gerar as formas de onda de tensão e de corrente.

Foram simuladas faltas no ATPDRAW™ para gerar formas de onda de tensão e de corrente, com taxa de amostragem de 1,2 kHz para análise do efeito das diversas fontes de erros no desempenho dos ABF. As LTs têm a geometria e materiais utilizados na LT Serra da Mesa 2/Luziânia, que é uma LT de EAT de 500 kV, com 313,8 km de comprimento e está em operação no Sistema Interligado Nacional – SIN. O padrão das faltas será LT transposta, sistema homogêneo, ângulo de carga θ de 0° , R_F de 0Ω e aplicadas no instante de tempo do pico de tensão. Os Bancos de Capacitores Série – BCSs – estão fora de operação e os Reatores de Linha estão inseridos. Essas características serão alteradas de acordo com a fonte de erro analisada e essas alterações serão descritas nas seções seguintes.

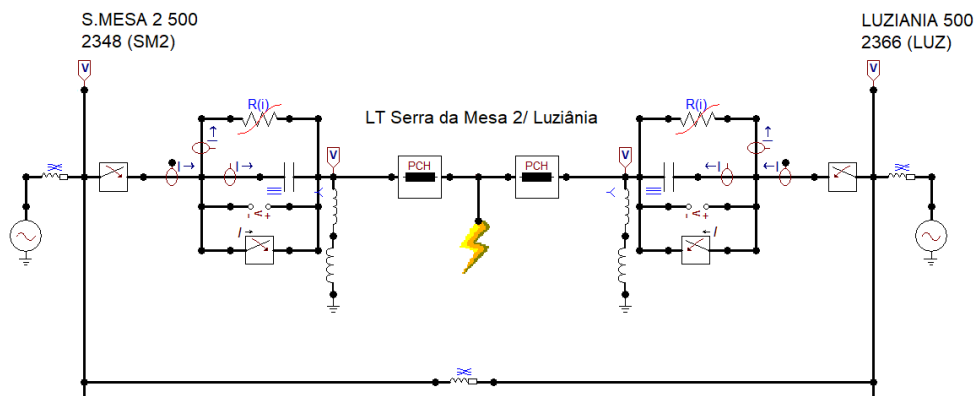
3.2 Sistema Homogêneo

O Sistema Homogêneo apresenta um equivalente de *Thévenin* em cada barra e uma ligação equivalente entre as barras, conforme apresentado na [Figura 7](#) e com os parâmetros da [Tabela 1](#). As impedâncias do Sistema Homogêneo têm o mesmo ângulo que as impedâncias da LT transposta, que estão apresentadas na [Tabela 2](#). O sistema Homogêneo será usado nas simulações dos casos para analisar o efeito de diferentes fontes de erros na estimativa da localização de falta: LT não transposta; LT transposta por seguimento; imprecisão do parâmetro de resistividade do solo; resistência de falta; componente *DC* de decaimento exponencial; variação de carga do sistema; Banco de Capacitor Série; e erro de sincronização de dados.

3.3 Sistema não Homogêneo

O Sistema não Homogêneo também apresenta um equivalente de Thévenin em cada barra e uma ligação equivalente entre as barras, conforme apresentado na [Figura 7](#), mas com os parâmetros da [Tabela 3](#). O sistema não homogêneo será usado nas simulações para análise do efeito da não homogeneidade do sistema no desempenho dos algoritmos.

Figura 7 – Sistema modelado no ATPDRAW™ para o Sistema Homogêneo e o Sistema não Homogêneo.



Fonte: Autor.

Tabela 1 – Equivalentes de *Thévenin* do Sistema Homogêneo.

| Equivalente de <i>Thévenin</i> | $Z_0[\Omega]$ | $Z_1[\Omega]$ |
|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Serra da Mesa 2 | 53,51 $\angle 76,70^\circ$ | 22,88 $\angle 86,30^\circ$ |
| Luziânia | 31,85 $\angle 76,70^\circ$ | 26,50 $\angle 86,30^\circ$ |
| Ligação entre as barras | 888,63 $\angle 76,70^\circ$ | 36,41 $\angle 86,30^\circ$ |

Fonte: Autor.

Tabela 2 – Parâmetros da LT Transposta utilizada nas simulações.

| Linha de Transmissão | $Z_0[\Omega]$ | $Z_1[\Omega]$ |
|----------------------|----------------------------|---------------------------|
| LT Transposta | 19,41 $\angle 76,70^\circ$ | 3,37 $\angle 86,30^\circ$ |

Fonte: Autor.

3.4 Linha de Transmissão

As LTs modeladas para estudar os efeitos das diferentes fontes de erros na estimativa de localização de faltas têm a geometria (Figura 8) e os materiais utilizados na LT Serra da Mesa 2/ Luziânia, que é uma LT de extra-alta tensão de 500 kV, com 313,8 km de comprimento e que está em operação no SIN. Foi utilizada a rotina *Line Constants* a partir do *LCC Template* do ATPDRAW™ e inseridos nos modelos simulados com o componente *PCH* a partir dos arquivos *punch* gerados. Foram gerados os modelos LT Transposta e LT não Transposta. A LT não Transposta tem a mesma geometria, materiais e parâmetros, com exceção da opção *Transposed*.

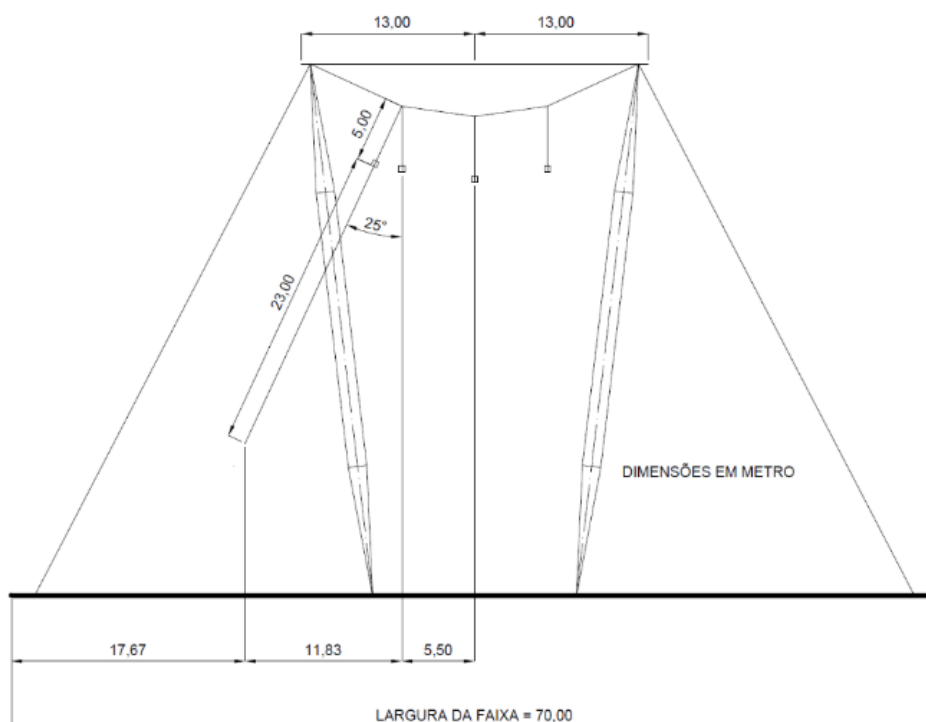
Os modelos LT Transposta e LT não Transposta foram inseridos no sistema homogêneo e no sistema não homogêneo (Figura 7) para simulação das faltas. O modelo

Tabela 3 – Equivalentes de *Thévenin* do Sistema não Homogêneo.

| Equivalente de <i>Thévenin</i> | $Z_0[\Omega]$ | $Z_1[\Omega]$ |
|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Serra da Mesa 2 | 52,99 $\angle 79,36^\circ$ | 22,94 $\angle 84,41^\circ$ |
| Luziânia | 40,46 $\angle 50,00^\circ$ | 30,54 $\angle 60,00^\circ$ |
| Ligação entre as barras | 950,01 $\angle 65,55^\circ$ | 36,54 $\angle 84,04^\circ$ |

Fonte: Autor.

Figura 8 – Geometria das torres predominantes da LT 500 kV Serra da Mesa 2/Luziânia, da LT 500 kV Samambaia/Luziânia e da LT 500 kV Luziânia/Paracatu 4.

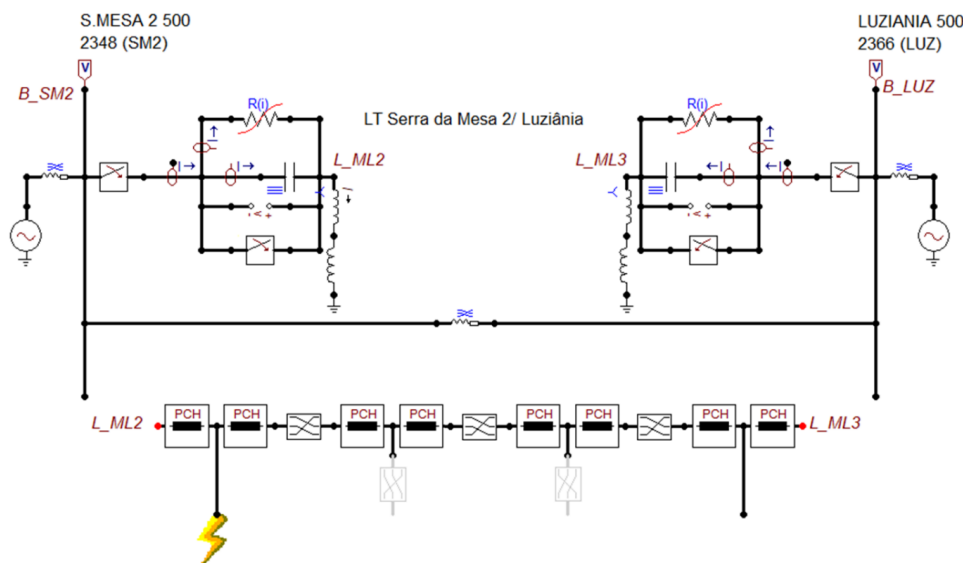


Fonte: SMTE (2007).

de LT não transposta foi inserido, também, no sistema apresentado na (Figura 9) para simulação dos casos de LT transposta por seguimento. Todos os detalhes e parâmetros utilizados no modelo das LTs estão apresentados no APÊNDICE A.

A LT 500 kV Serra da Mesa 2/Luziânia possui Banco de Reatores e Banco de Capacitores Série – BCS – nas duas extremidades, conforme mostrado nas Figuras 7, 9 e 12. Os parâmetros usados para o modelamento desses equipamentos estão apresentados no APÊNDICE A. Os Bancos de Reatores foram conectados à LT em todas as simulações. Os BCSs foram mantidos fora de operação durante todas as simulações, exceto nas simulações da seção 4.6, onde serão analisados o efeito dos BCSs nos ABFs. O modelo de BCS utilizado representa os capacitores e os Varistores de Oxido Metal – MOV.

Figura 9 – Sistema modelado para simulação dos casos de LT transposta por seguimento.



Fonte: Autor.

3.5 Sistema elétrico real

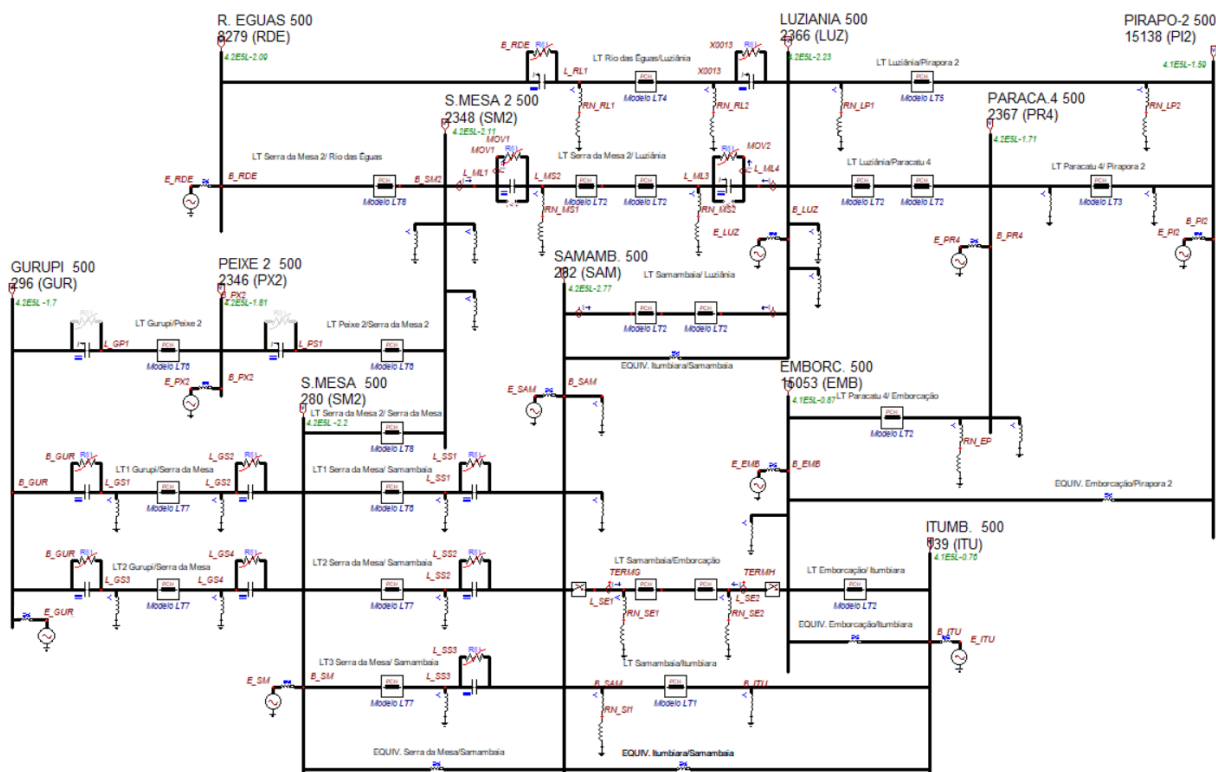
O sistema elétrico real modelado no ATPDRAWTM é um trecho da interligação norte-sul do SIN (Figura 10). A área externa aos equipamentos modelados foi representada por equivalentes de *Thévenin* obtidos a partir da ferramenta de cálculo de equivalentes do ANAFAS[®]. O sistema equivalente não contém explicitamente a área externa, porém o seu efeito nas grandezas calculadas na área interna é considerado através das ligações equivalentes série e *shunt* que surgem na construção do sistema equivalente (CEPEL ANAFAS, 2017).

O método de seleção da região preservada foi por conjuntos de barras. As barras do sistema interno, que estão conectadas ao sistema externo, são chamadas de barras de fronteira. Foram selecionadas como barras de fronteira, as barras setor de 500 kV das subestações: Gurupí, Serra da Mesa, Serra da Mesa 2, Rio das Éguas, Samambaia, Luziânia, Itumbiara, Emborcação, Paracatu 4 e Pirapora 2, conforme apresentado na Figura 11.

O cálculo de equivalentes utilizado preserva todos os circuitos série e shunt originais ligados às barras de fronteira, insere as impedâncias equivalentes e fontes de *Thévenin* entre as barras de fronteira e a referência e insere ligações equivalentes entre as barras. No caso estudado, foram desprezadas ligações equivalentes maiores que 0,5 pu (1250 Ω).

O APÊNDICE A apresenta o modelamento do sistema elétrico detalhando: os parâmetros dos equipamentos, os equivalentes de *Thévenin* e outros resultados obtidos do ANAFAS[®]; os cálculos dos parâmetros elétricos a partir dos parâmetros geométricos das LTs utilizando o ATPDRAWTM; os parâmetros dos compensadores série; e os parâmetros dos compensadores shunt. Esses parâmetros e informações foram aplicados aos componentes

Figura 12 – Modelo do Sistema Elétrico Real Implementado no ATPDRAW™.



Fonte: Autor.

Tabela 4 – Resultados das simulações de faltas trifásicas e monofásicas francas nos modelos do ANAFAS® e do ATPDRAW™.

| Barra | Corrente das faltas monofásicas [kA] | | | | Corrente das faltas trifásicas [kA] | | | |
|-----------------|--------------------------------------|---------------|---------|----------------|-------------------------------------|---------------|---------|----------------|
| | ANAFAS | ANAFAS Equiv. | ATPDraw | ATPDraw c/ MOV | ANAFAS | ANAFAS Equiv. | ATPDraw | ATPDraw c/ MOV |
| Emborcação | 23,16 | 23,95 | 22,69 | 22,66 | 24,40 | 22,76 | 24,83 | 24,30 |
| Gurupi | 10,93 | 11,70 | 10,74 | 10,75 | 22,95 | 22,35 | 21,60 | 21,70 |
| Itumbiara | 29,60 | 29,30 | 29,54 | 29,50 | 30,07 | 29,71 | 30,57 | 30,70 |
| Luziânia | 14,78 | 14,12 | 13,88 | 13,90 | 18,60 | 17,75 | 16,68 | 17,44 |
| Peixe 2 | 10,63 | 10,34 | 9,91 | 9,79 | 19,49 | 18,95 | 18,13 | 14,66 |
| Pirapora 2 | 7,75 | 7,17 | 6,96 | 6,95 | 7,67 | 7,07 | 6,98 | 6,97 |
| Rio das Éguas | 6,74 | 5,91 | 5,57 | 5,57 | 11,87 | 11,17 | 10,54 | 10,26 |
| Samambaia | 19,02 | 18,49 | 19,04 | 19,17 | 22,34 | 21,68 | 22,12 | 22,36 |
| Paracatu 4 | 8,40 | 7,98 | 7,94 | 7,92 | 12,35 | 11,70 | 11,05 | 11,73 |
| Serra da Mesa | 22,20 | 21,75 | 21,87 | 21,60 | 23,85 | 23,17 | 23,50 | 22,76 |
| Serra da Mesa 2 | 11,97 | 11,56 | 11,41 | 11,3 | 19,66 | 19,00 | 19,00 | 17,92 |

Fonte: Autor.

3.6 Cálculo do desempenho dos ABFs

Os resultados obtidos ao aplicar os algoritmos de localização de faltas nos casos simulados no ATPDRAWTM e nas oscilografias de faltas reais registradas pelos IEDs dos sistemas de proteção serão comparados com o local real da falta para análise do desempenho. O guia [IEEE Std C37.114TM-2014 \(2015\)](#) apresenta três métodos para determinação do erro de medição: Erro absoluto; Erro relativo tradicional; Erro relativo com base no comprimento da linha.

O valor fornecido pelo método de erro absoluto, descrito na equação (3.1), apresenta o resultado em unidade de comprimento. Esse método facilita uma interpretação prática, mas não permite a comparação entre os resultados encontrados em LTs com comprimentos distintos.

$$E_a = |l_f - l_r| = |m.l - m_r.l| = |m - m_r|l \quad (3.1)$$

O método de erro relativo tradicional, descrito em (3.2), leva em consideração o erro em relação à distância real da falta o que permite uma análise estatística, mas dificulta uma interpretação prática dos algoritmos dois terminais, uma vez que, os resultados obtidos para terminais distintos da LT são diferentes, exceto para faltas na metade da LT.

$$E_t = \frac{|l_f - l_r|}{l_r} = \frac{|m.l - m_r.l|}{m_r.l} = \frac{|m - m_r|}{m_r} \quad (3.2)$$

O método de erro relativo com base no comprimento de linha, descrito em (3.3), leva em consideração o erro em relação ao comprimento da LT, permitindo uma análise aplicável a todos os algoritmos estudados neste trabalho. Esse método será utilizado na definição do erro para análise do desempenho dos algoritmos em todas as análises de resultados deste trabalho. Os resultados serão expressos em porcentagem, conforme apresentado na equação (3.4).

$$E_l = \frac{|l_f - l_r|}{l} = \frac{|m.l - m_r.l|}{l} = |m - m_r| \quad (3.3)$$

$$E_{\%} = |m - m_r|.100 \quad (3.4)$$

A [Figura 13](#) apresenta os sinais de corrente de uma falta monofásica aplicada na LT Transposta, inserida no sistema homogêneo, a 25% da linha de transmissão, com resistência de falta de 0Ω e aplicada no ponto de tensão igual a zero. O algoritmo de estimação de fasores utilizado neste trabalho, Transformada Discreta de Fourier – *DFT*, utiliza uma janela de dados de um ciclo. Serão utilizados os fasores dos sinais de tensão e de corrente estimados no terceiro e no quarto ciclo de falta, para evitar que a janela do

filtro *DFT* inclua amostras do transitório do início da falta, reduzindo os erros causados no processo de estimação de fasores. O intervalo considerado está destacado entre os cursores pretos da [Figura 13a](#).

Os fasores de tensão e corrente podem apresentar oscilações devido à componente *DC* de decaimento exponencial, componentes sub-harmônica e outras fontes de erro. A [Figura 13b](#) apresenta as distorções na amplitude dos fasores de corrente causadas pela componente *DC* de decaimento exponencial. Essas distorções afetam o resultado da estimativa de distância de falta, conforme apresentado na [Figura 13c](#). Observa-se que, dependendo do instante de tempo calculado, há variações de -24% a 25% da LT. A [Figura 13d](#) apresenta impacto dessa variação no resultado da subtração $(m - m_r)$ de (3.4) apresentado em porcentagem.

As distorções no resultado dificultam a avaliação do desempenho dos algoritmos, porque há a variação do erro em função do instante de tempo escolhido. Nesse exemplo, o erro oscila de 0% a $1,5\%$. Para viabilizar a interpretação dos resultados, o resultado da distância da falta, m , utilizada em (3.4) será a mediana dos resultados encontrados no intervalo definido entre os cursores pretos apresentados na [Figura 13](#). [Lopes et al. \(2020\)](#) demonstram que o uso da mediana dos valores calculados no período estacionário de falta apresenta melhor desempenho que o valor médio e, portanto, será utilizada.

3.7 Modelo de falta

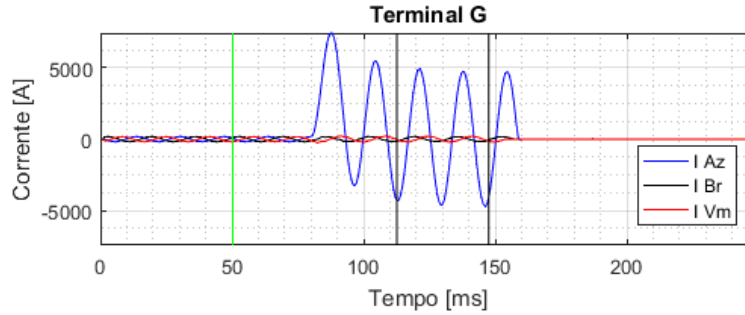
A [Figura 14](#) apresenta as faltas *shunts* típicas que serão simuladas neste trabalho. A [Figura 14f](#) apresenta o modelo geral de falta. Esse modelo foi implementado no ATPDRAWTM, [Figura 15](#), para simulação dos diferentes tipos de falta. As impedâncias serão ajustadas de acordo com o tipo da falta e um algoritmo coordena o fechamento de um conjunto de chaves para permitir a reprodução dos diferentes tipos de faltas apresentadas [Figura 14](#).

3.8 Considerações Finais

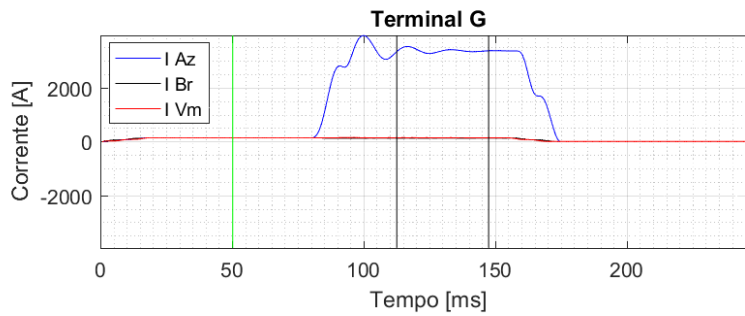
Esse capítulo apresentou os detalhes dos modelos dos Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica que serão utilizados para simular faltas nas LTs e gerar as formas de onda de tensão e de corrente. Os ABFs apresentados no [Capítulo 2](#) serão aplicados nos resultados dessas simulações, para avaliação dos desempenhos, considerando diferentes tipos de faltas e diversas fontes de erros.

Figura 13 – Falta monofásica a 25% da LT Transposta, Sistema Homogêneo, $\theta = 0^\circ$, $R_F = 0 \Omega$ e aplicadas no instante de tempo de tensão zero.

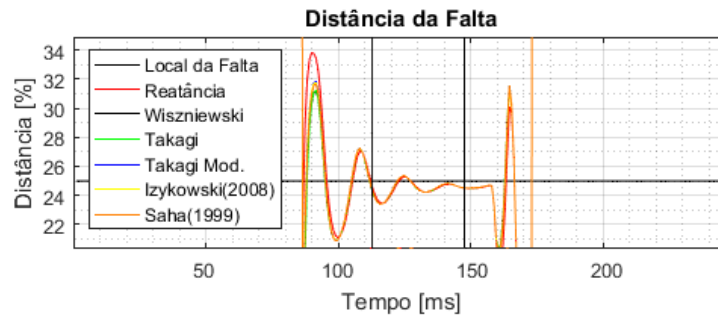
(a) Sinais de corrente.



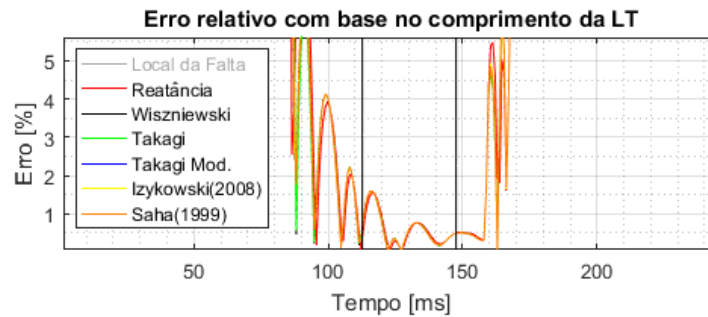
(b) Amplitude dos fasores de corrente em RMS.



(c) Resultado dos algoritmos de um terminal.

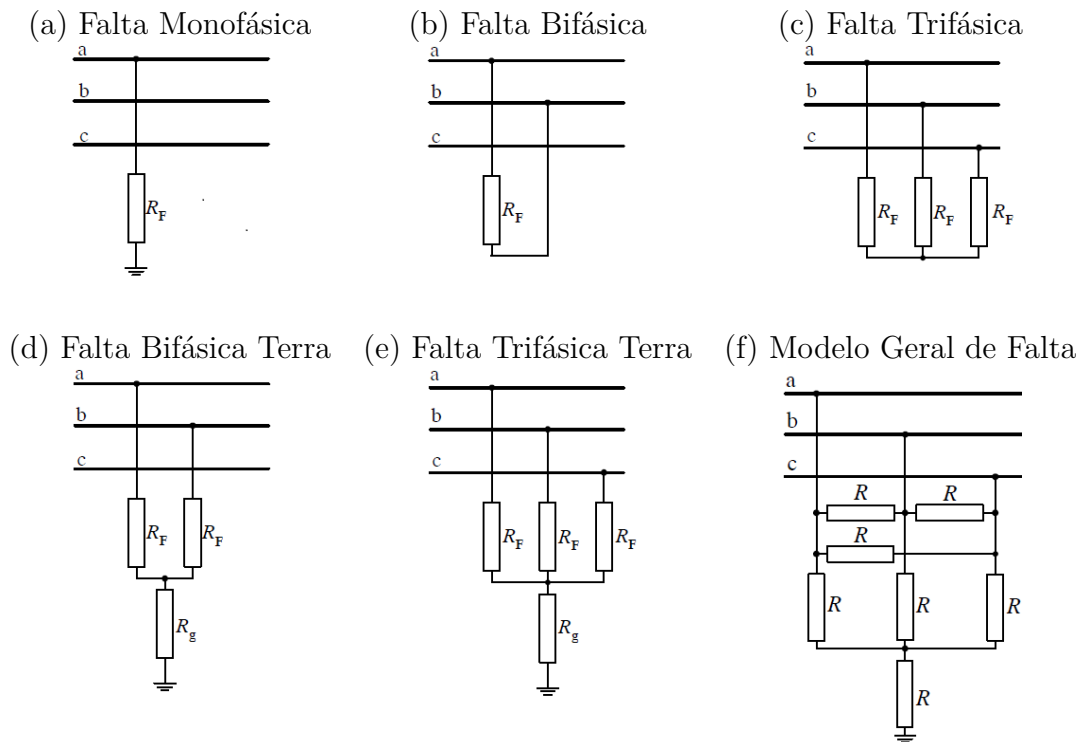


(d) Erro dos resultados dos algoritmos de um terminal.



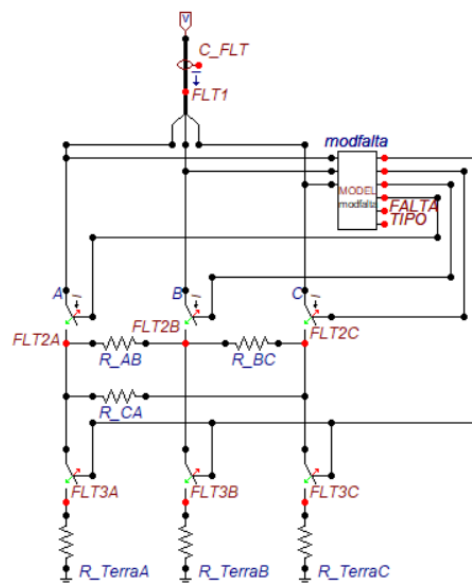
Fonte: Autor.

Figura 14 – Falhas *Shunt* Típicas.



Fonte: Saha *et al.* (2009).

Figura 15 – Modelo de falta implementado no ATPDRAW™.



Fonte: Autor.

4 Apresentação e Análise dos Resultados dos Casos de Faltas Simuladas

4.1 Considerações Iniciais

Os algoritmos de localização de faltas com base em fasores apresentam particularidades e se distinguem quanto aos dados de entrada, ao modelo da LT e às premissas para calcular a estimativa de distância da falta. Os erros na aquisição de dados de entrada, o uso do modelamento inadequado para um determinado cenário e a violação das premissas de um determinado algoritmo podem causar erros consideráveis nessa estimativa.

Este capítulo traz uma análise dos efeitos de diversas fontes de erros no desempenho dos ABFs: LTs não transpostas, ou com trechos longos sem transposição; imprecisão da resistividade do solo; resistência de falta; componente *DC* de decaimento exponencial; variação da carga do sistema; não homogeneidade do sistema; compensação série e erro de sincronização de dados. Outras fontes de erro não serão apresentadas como: saturação do TC; LTs de três terminais; LTs não homogêneas e acoplamento mútuo em LTs paralelas.

4.2 Efeito da transposição da LT no desempenho dos ABFs

A transposição das LTs tem o propósito de equalizar as impedâncias entre as fases, evitando desequilíbrios nas tensões e nas correntes. LTs transpostas simplificam a análise com componentes simétricos, porque as três equações acopladas no domínio de fase tornam-se três equações desacopladas no domínio de componentes simétricos (DAS *et al.*, 2014).

A matriz de impedância de fase (4.1) representa as impedâncias da LT e pode ser usada para determinar a queda de tensão em um trecho da LT a partir das correntes da LT. Os elementos da diagonal principal representam as impedâncias próprias e os elementos fora da diagonal representam as impedâncias mutuas entre fases. A equação (4.1) pode ser transformada para o domínio de sequência, utilizando a matriz de transformação (4.2), resultando na matriz (4.3). Na equação os termos da diagonal principal da matriz são as impedâncias de sequência e os termos fora da diagonal representam o acoplamento mútuo entre os circuitos de sequência (KERSTING, 2002).

$$Z_{L_{abc}} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$A_S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}; \quad a = 1\angle 120^\circ \quad (4.2)$$

$$Z_{L_{123}} = A_S^{-1} \cdot Z_{L_{abc}} \cdot A_S = \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

A matriz de impedância de uma LT Transposta (4.4) tem o acoplamento mútuo entre as fases – Z_m – iguais e, conseqüentemente, os termos fora da diagonal da matriz de impedância de seqüência (4.5) tornam-se zero. Os elementos diagonais são formados pelas impedâncias de seqüência da linha (KERSTING, 2002).

$$Z_{L_{abc}} = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$Z_{L_{123}} = A_S^{-1} \cdot Z_{L_{abc}} \cdot A_S = \begin{bmatrix} Z_0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_2 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

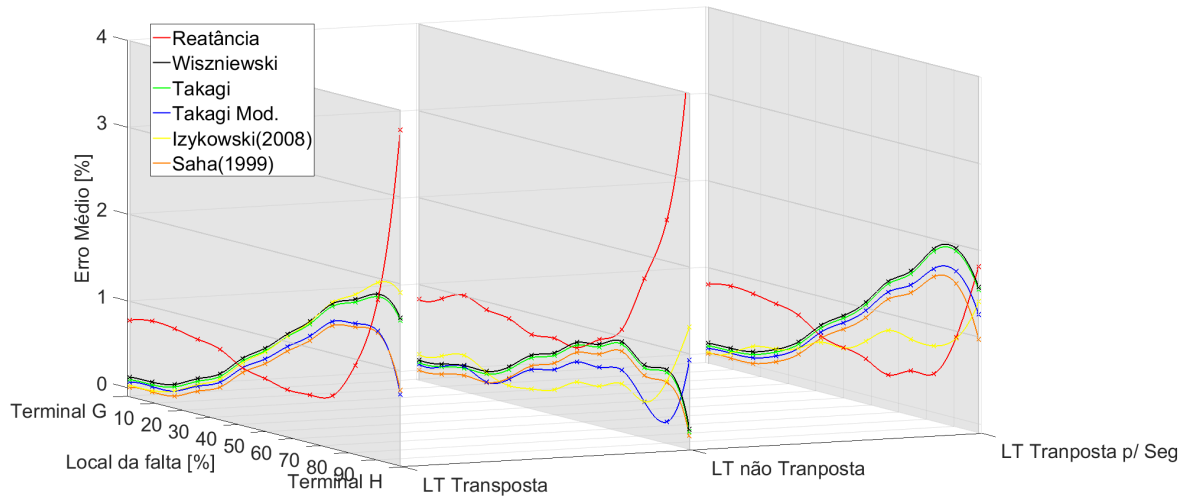
A abordagem de componentes simétricos pode ser efetivamente usada para localizar faltas em linhas perfeitamente simétricas, isto é, em LTs transpostas. Entretanto, na prática, existem LTs não transposta ou com segmentos longos sem transposição dos condutores (SAHA *et al.*, 2009). Vários trabalhos abordam algoritmos para serem aplicados em LTs não transpostas. Girgis *et al.* (1992) utiliza uma abordagem matricial com as três equações acopladas no domínio da fase representados matricialmente por vetores trifásicos. Johns e Jamali (1990) utilizam a teoria dos modos naturais e a teoria das funções matriciais para desacoplar as equações do domínio de fase podendo, também, ser aplicado em LTs não transpostas.

Não é possível construir uma LT transposta continuamente. O desacoplamento no domínio das componentes simétricas pode ser obtido trocando fisicamente a posição dos condutores de fase em intervalos periódicos, de modo que um condutor em particular ocupe todas as posições de uma configuração de linha específica (Figura 16) (DAS *et al.*, 2014).

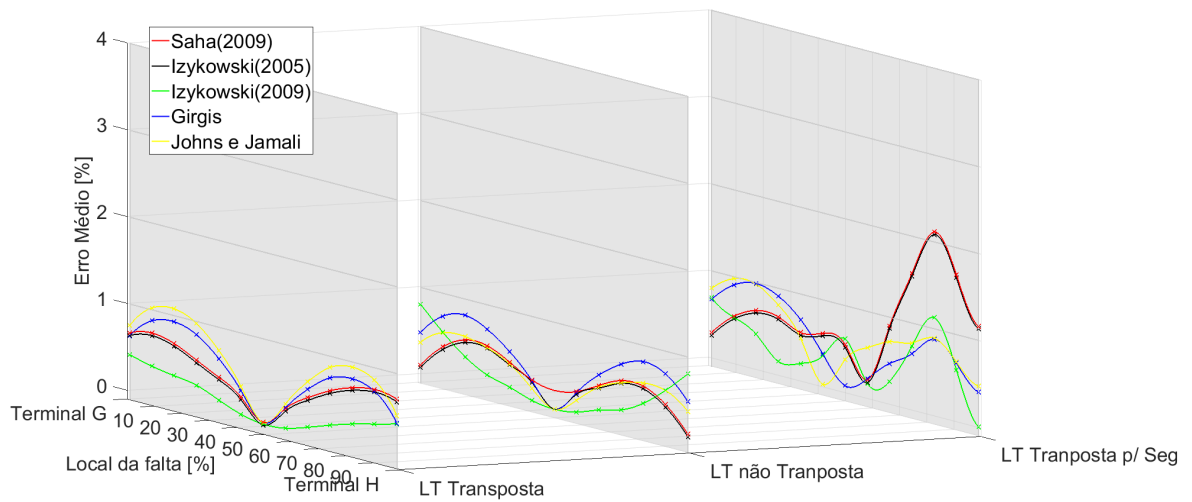
Os algoritmos foram avaliados em simulações utilizando os modelos de LT transposta, não transposta e transposta por seguimento. As resistências de falta utilizadas, nos casos de faltas monofásicas, foi de 10Ω e, nos demais casos, 5Ω .

Figura 17 – Efeito da transposição da LT nos ABFs: Faltas monofásicas ao longo da LT, Sistema Homogêneo, $\theta = 0^\circ$, $R_F = 10 \Omega$ e aplicadas no instante de tempo do pico de tensão.

(a) ABFs de Um Terminal.



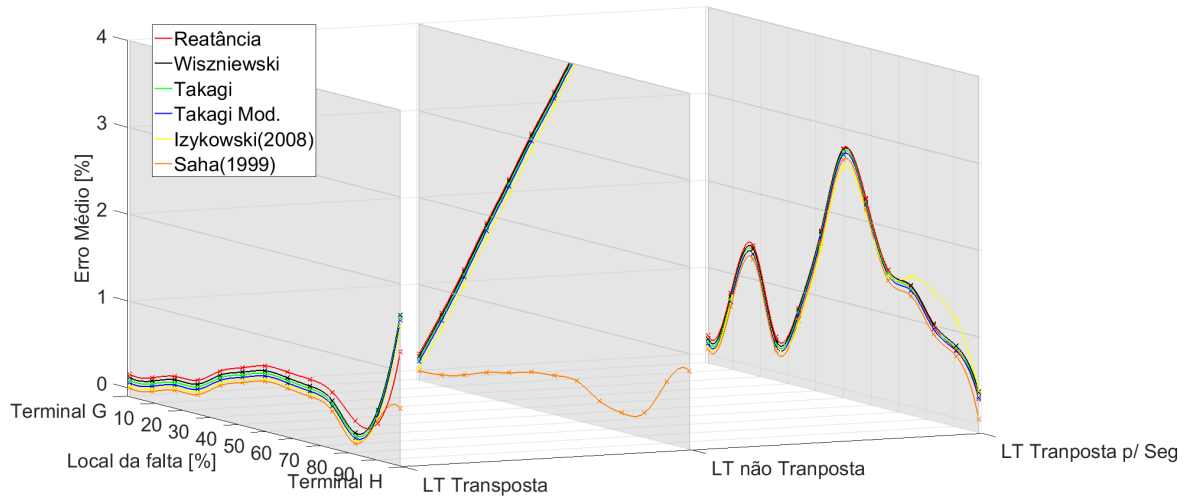
(b) ABFs de Dois Terminais.



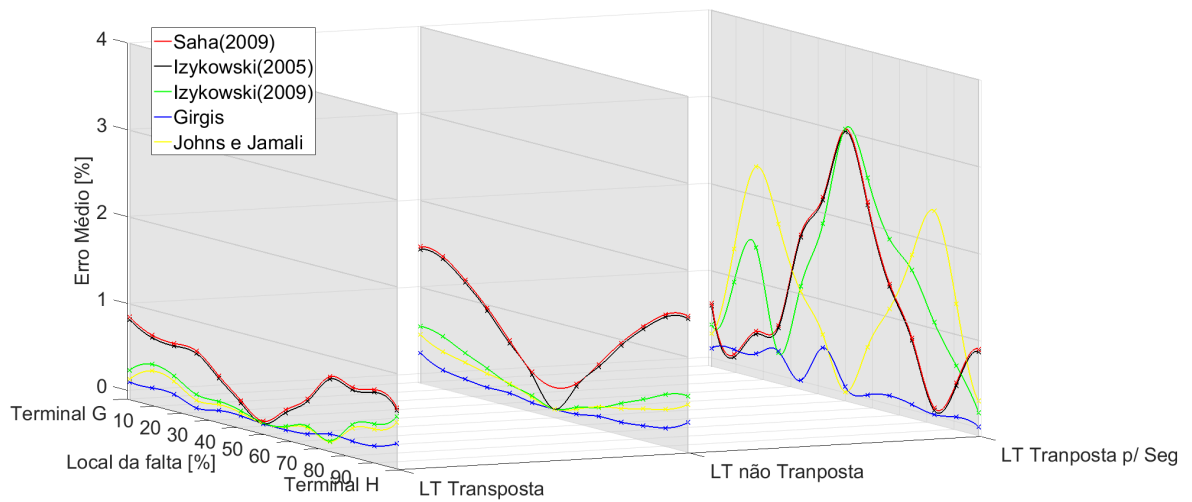
Fonte: Autor.

Figura 18 – Efeito da transposição da LT nos ABFs: Faltas bifásicas ao longo da LT, Sistema Homogêneo, $\theta = 0^\circ$, $R_F = 5 \Omega$ e aplicadas no instante de tempo do pico de tensão.

(a) ABFs de Um Terminal.



(b) ABFs de Dois Terminais.



Fonte: Autor.

4.3 Efeito da imprecisão do parâmetro de Resistividade do Solo no desempenho dos ABFs

Os valores de resistividade do solo – ρ – variam com as condições físicas do solo, a umidade e a temperatura (AMBERG *et al.*, 2012). O Quadro 7 mostra os diferentes valores de resistividade do solo para diferentes tipos de solo. A resistividade do solo argiloso e do solo arenoso, por exemplo, pode variar de 300 Ω m a 5000 Ω m e de 1000 Ω m a 8000 Ω m, respectivamente. A Figura 19 mostra a variação da resistividade do solo com a temperatura, a umidade e o conteúdo mineral. A interpretação dos dados das medições de resistividade pode variar consideravelmente em solos com resistividades não uniformes. A complexidade adicional causada por solos não uniformes é comum e, em apenas alguns casos, as resistividades do solo são constantes com o aumento da profundidade (IEEE Std 81™-2012, 2012).

Resistividade do solo desempenha um papel crítico no cálculo da impedância de sequência zero da LT. A Figura 20 mostra o impacto do valor da resistividade do solo no cálculo das impedâncias de sequência positiva e de sequência zero do modelo LT Transposta utilizado neste capítulo. A impedância de sequência positiva da LT permanece inalterada com as alterações da resistividade do solo, enquanto que, a impedância de sequência zero aumenta à medida que a resistividade do solo aumenta.

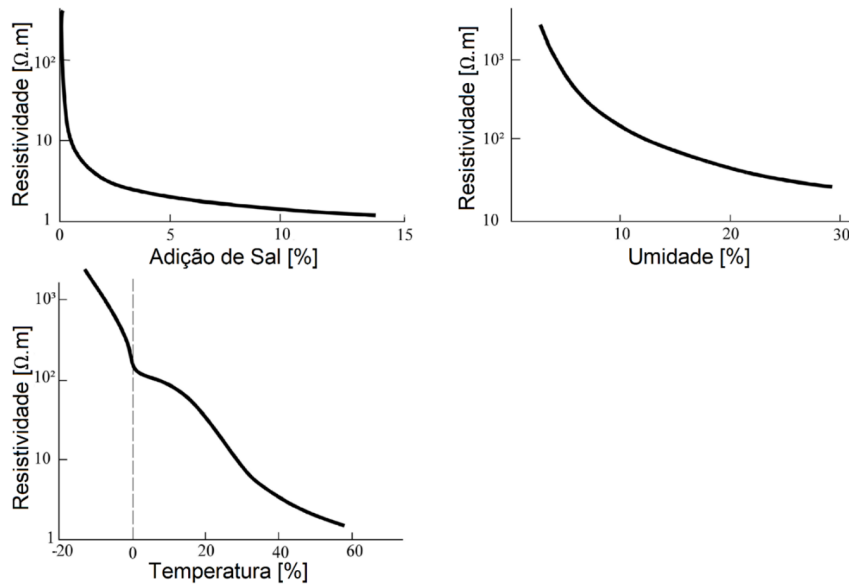
Quadro 7 – Valores típicos de resistividade de alguns tipos de solo.

| Tipos de Solo | Faixa de resistividade [Ω .m] |
|------------------------------|---|
| Água do mar | Menor que 10 |
| Alagadiço, limo, húmus, lama | Até 150 |
| Água destilada | 300 |
| Argila | 300 – 5.000 |
| Calcário | 500 – 5.000 |
| Areia | 1.000 – 8.000 |
| Granito | 1.500 – 10.000 |
| Basalto | A partir de 10000 |
| Concreto | Molhado: 20 – 100; Húmido: 300 – 1000; Seco: 3000 – 2.000.000 |

Fonte: NBR7117:2012 (2012).

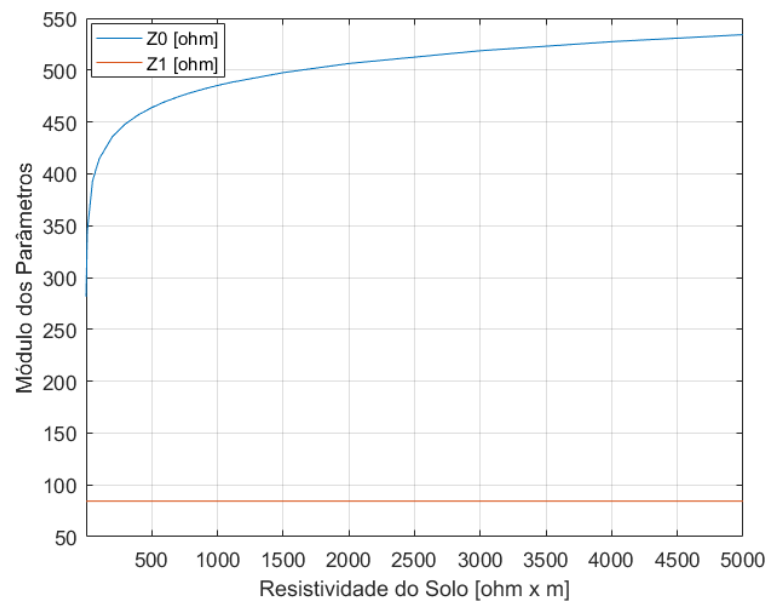
Os valores de resistividade do solo variam ao longo da LT e pelas condições de

Figura 19 – Variações da Resistividade do Solo em função da quantidade de sal, da umidade e da temperatura.



Fonte: IEEE Std 81TM-2012 (2012).

Figura 20 – Efeito da variação da resistividade do solo nos parâmetros da LT.

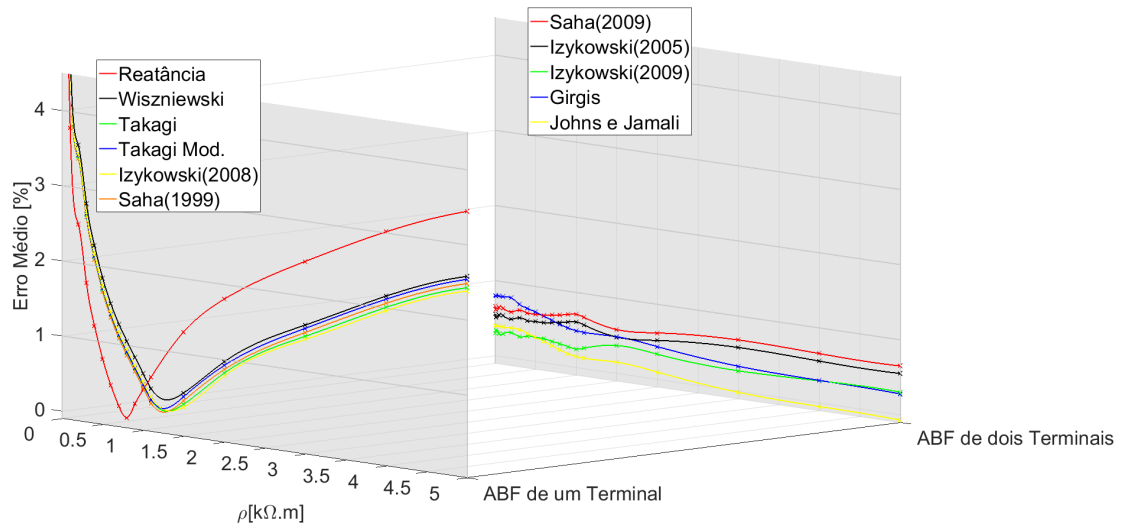


Fonte: Autor.

temperatura e de umidade, mas o ajuste de impedância de sequência zero da LT, utilizado nos algoritmos de localização de falhas, é calculado a partir de um valor fixo de resistividade do solo. O modelo de LT Transposta foi inserido no Sistema Homogêneo para mostrar o efeito da variação da resistividade do solo no desempenho dos algoritmos de localização da falta com base em fasores. Foram simulados casos de falhas monofásicas a 40% da LT Transposta, $R_F = 10 \Omega$ e com ρ variando entre $10 \Omega \cdot m$ e $5000 \Omega \cdot m$. Os ABFs foram

configurados com Z_{0L} calculada pelo ATPDRAWTM usando $\rho = 1000 \Omega \text{ m}$.

Figura 21 – Efeito da imprecisão do parâmetro de Resistividade do Solo nos ABFs: Falhas monofásicas a 40% LT Transposta com ρ variando de $10 \Omega \text{ m}$ a $5000 \Omega \text{ m}$, Sistema Homogêneo, $\theta = 0^\circ$, $R_F = 10 \Omega$ e aplicadas no instante de tempo do pico de tensão.



Fonte: Autor.

Os ABFs de um terminal, exceto o algoritmo da Reatância Simples, apresentam erros abaixo de 1% para os casos dentro da faixa de $700 \Omega \text{ m}$ a $2100 \Omega \text{ m}$, conforme apresentado na Figura 21. Para variações além dessa faixa, observa-se a perda de desempenho com erros acima de 2%. Os ABFs de dois terminais não utilizam Z_{0L} e, portanto, não são afetados por variações no desempenho.

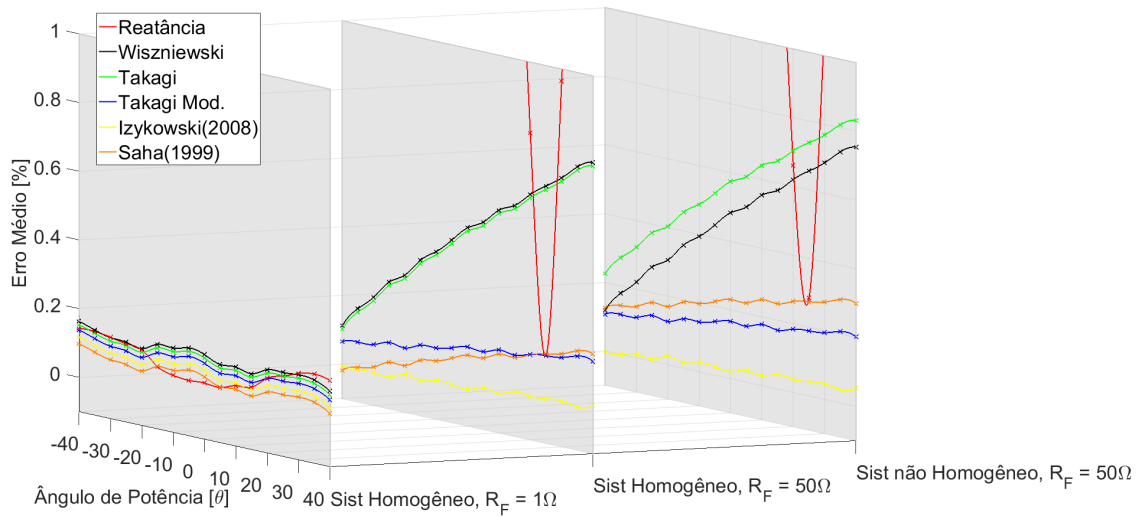
4.4 Efeito da Resistência de Falta, da Variação de Carga e do Sistema não Homogêneo no desempenho dos ABFs

As faltas podem ser classificadas em relação à R_F , sendo divididas em faltas francas ou resistiva. Em geral, as faltas entre fases apresentam R_F inferiores $0,5 \Omega$. Faltas monofásicas por *flashover* de isolador também apresenta R_F baixa, não ultrapassando 3Ω . Entretanto, em casos envolvendo árvores ou contato em solo a R_F pode se tornar elevada (SAHA *et al.*, 2009).

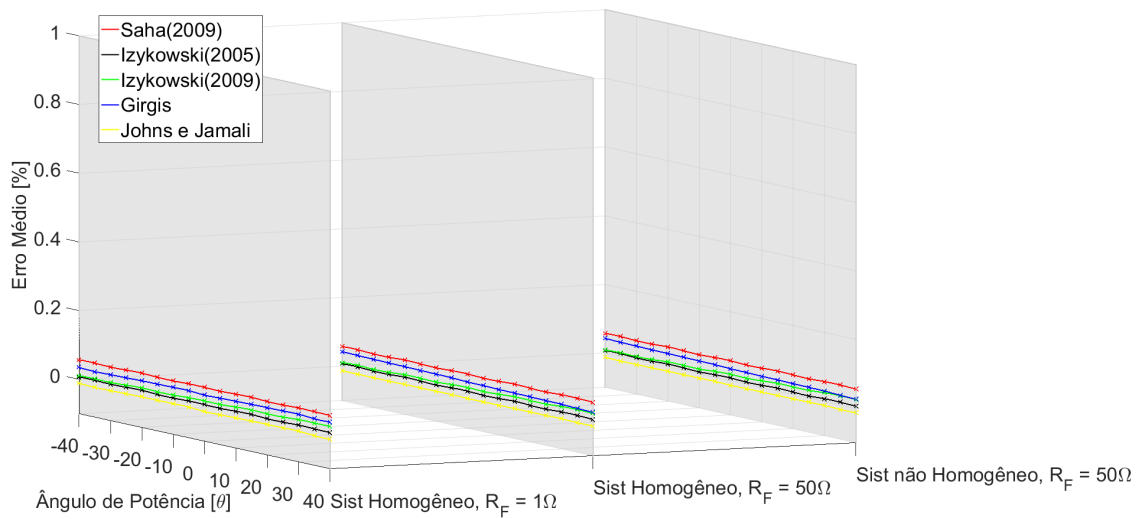
Foram simuladas faltas monofásicas a 50% da LT para analisar o impacto do “efeito reatância” na precisão dos ABF. São apresentados três casos: Sistema Homogêneo e $R_F = 1 \Omega$, Sistema Homogêneo e $R_F = 50 \Omega$, Sistema não Homogêneo e $R_F = 50 \Omega$. Os ABFs de dois terminais não são afetados pela variação da R_F em nenhum caso, conforme apresentado na Figura 22. Para faltas francas os ABFs de um terminal são precisos, mesmo sob condições de carga pesada. Em faltas resistivas, o algoritmo da Reatância Simples apresenta erros de até 15%. O demais ABFs de um terminal apresentam variações pouco expressivas de desempenho, por terem recursos para redução do erro devido ao “efeito de reatância”. O algoritmo (TAKAGI *et al.*, 1982), não considera a homogeneidade do sistema, apresentando uma pequena perda de desempenho nessa condição.

Figura 22 – Impacto do “Efeito Reatância” nos ABFs: Faltas monofásicas aplicadas a 50% da LT Transposta, Sistema Homogêneo e Sistema Não Homogêneo, θ variando de -40° a 40° , $R_F = 1\ \Omega$ e $50\ \Omega$ e aplicadas no instante de tempo do pico de tensão.

(a) ABFs de Um Terminal.



(b) ABFs de Dois Terminais.



Fonte: Autor.

4.5 Efeito da Componente DC de decaimento exponencial no desempenho dos ABFs

Em geral, as impedâncias das LTs e do sistema de transmissão, na análise de curto-circuito, são predominantemente indutivas. Nesse caso, a assimetria provocada pela componente DC de decaimento exponencial é máxima quando ocorre uma falta próxima ao cruzamento em zero da forma de onda de tensão e mínima quando ocorre próxima ao pico de tensão (DAS *et al.*, 2014).

Em faltas causadas por mecanismo lento, o arco sempre ocorrerá no pico de tensão quando houver o rompimento do isolamento e, por isso, não haverá componente DC de decaimento exponencial. No pico de tensão, o estresse elétrico estará em seu nível mais alto para iniciar o processo de ionização, levando ao arco, causando eventualmente a ocorrência de falta. Isso pode acontecer nos seguintes cenários de falta: Contato com arvore por aproximação; objeto aterrado que se move em direção a uma linha energizada; queda de condutor ao chão; rompimento de isolamento devido à poluição ou gelo; e falta de isolamento de um componente do sistema (cabo, transformador, etc.). As faltas podem ser causadas por fenômenos de alta velocidade, como descargas atmosféricas, e, como resultado, o ponto de incidência da falta pode se tornar aleatório (IBRAHIM, 2012).

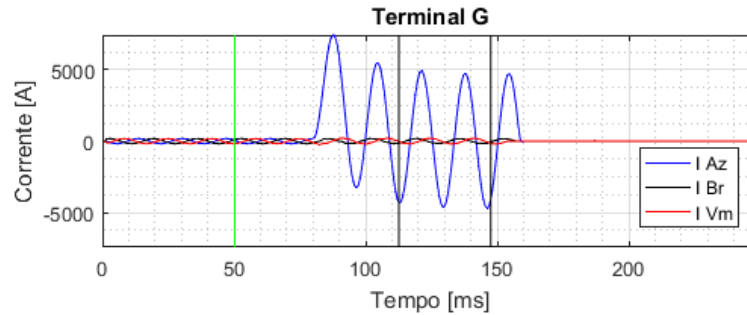
Os ABFs utilizam os fasores de tensão e de corrente na frequência fundamental os quais, nesse trabalho, são estimados com o algoritmo Transformada Discreta de Fourier – DFT – a partir das amostras de sinais de tensão e de corrente. Oliveira e Souza (2012) observam que os componentes harmônicos são filtrados pelo filtro DFT , mas a componente DC de decaimento exponencial não é facilmente filtrada por ter um espectro de frequências relativamente amplo. Eles apresentam e avaliam o desempenho de diversos algoritmos de estimação de fasores em relação à imunidade à componente DC de decaimento exponencial.

O algoritmo cosseno modificado – ACM – (HART *et al.*, 2000) estima os fasores a partir de duas saídas consecutivas do filtro cosseno de um ciclo de Fourier, sendo necessário para isso aplicar um fator de correção, a fim de obter a ortogonalidade entre as partes real e imaginária do fasor. O algoritmo apresenta um bom desempenho na eliminação da componente DC de decaimento exponencial, uma vez que utiliza apenas o filtro cosseno de Fourier e apresenta o atraso de apenas uma amostra de sinal (OLIVEIRA; SOUZA, 2012).

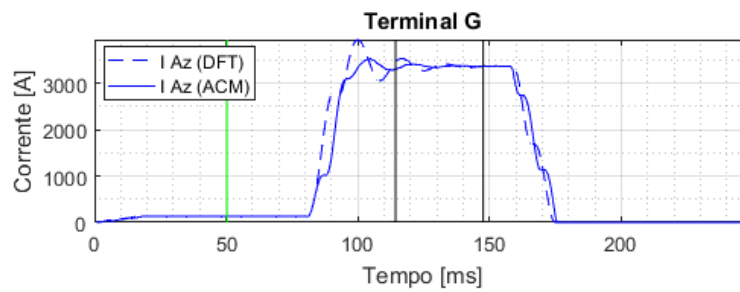
A Figura 23b apresenta a comparação do resultado obtido com o filtro DFT e com o ACM. Observa-se que o ACM apresenta um desempenho melhor na eliminação da componente DC de decaimento exponencial, reduzindo as distorções na amplitude dos fasores, melhorando o desempenho dos algoritmos de localização de faltas, conforme observado na Figura 23c e na Figura 23d.

Figura 23 – Falta monofásica a 25% da LT Transposta, Sistema Homogêneo, $\theta = 0^\circ$, $R_F = 0 \Omega$ e aplicadas no instante de tempo de tensão zero.

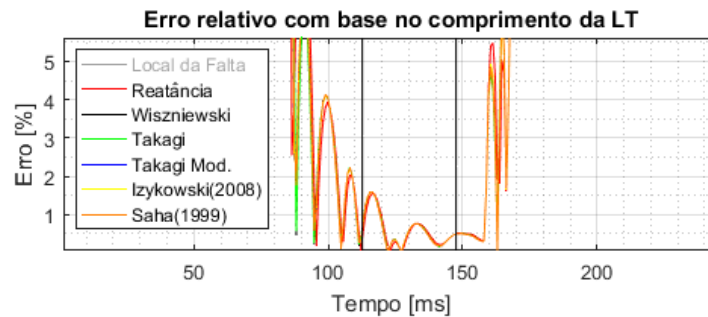
(a) Sinais de corrente.



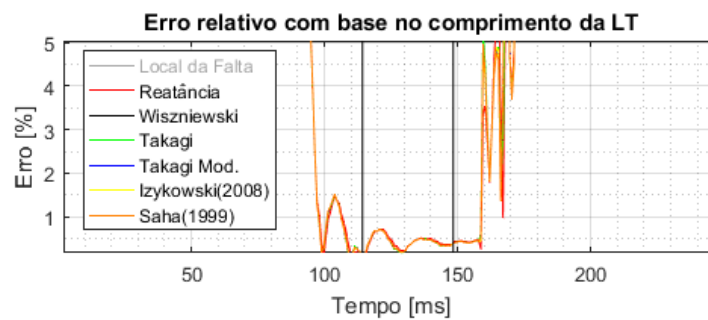
(b) Amplitude dos fasor de corrente: Comparação do desempenho dos filtros DFT e ACM.



(c) Resultado dos ABFs de Um Terminal utilizando o filtro *DFT*.



(d) Resultado dos ABFs de um terminal utilizando o filtro ACM.

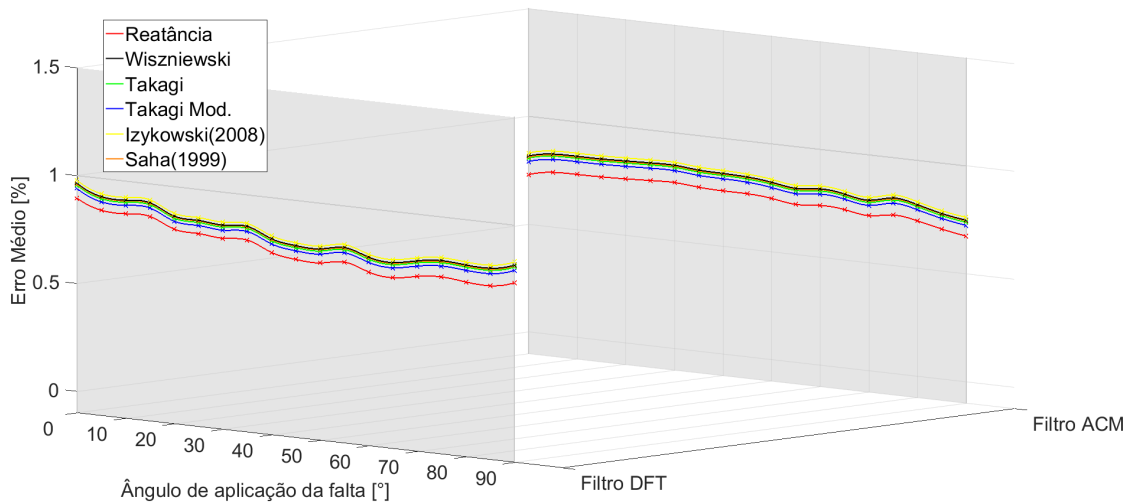


Fonte: Autor.

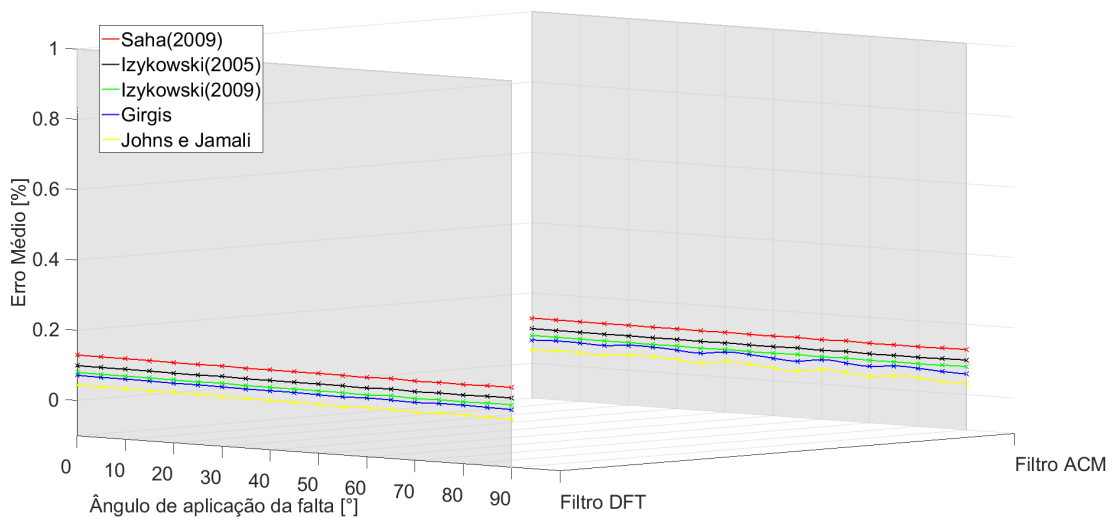
A utilização da mediana dos resultados, encontrados no período estacionário de falta, também reduz o impacto das distorções. A Figura 24 mostra os resultados para faltas monofásicas $R_F = 0\Omega$ variando o ângulo de aplicação de 0° , tensão zero, a 90° , pico de tensão. Os ABFs apresentam um desempenho satisfatório, utilizando o filtro *DFT*, com uma pequena redução de desempenho para as faltas próximas ao ponto de tensão zero. A utilização do ACM aprimora o resultado, eliminando o impacto da Componente *DC* de decaimento exponencial.

Figura 24 – Análise do efeito da Componente *DC* de decaimento exponencial nos ABFs: Faltas monofásicas aplicadas a 50% da LT Transposta, Sistema Homogêneo, $\theta = 0^\circ$, $R_F = 0\Omega$, variando o instante de aplicação da falta e utilizando o Filtro *DFT* e o Filtro ACM.

(a) ABFs de Um Terminal.



(b) ABFs de Dois Terminais.



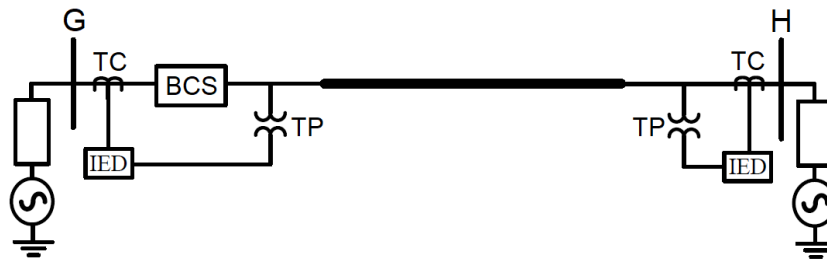
Fonte: Autor.

4.6 Efeito do Banco de Capacitor Série — BCS — no desempenho dos ABFs

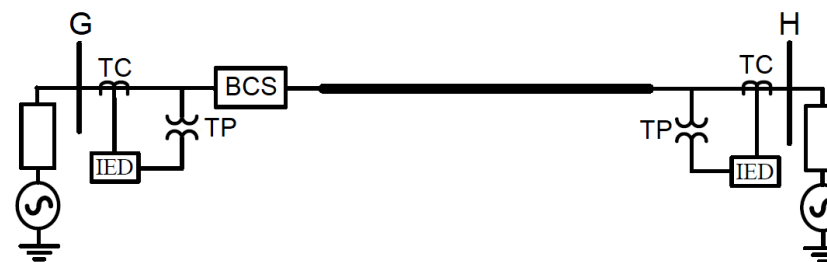
A Compensação Série de LTs aumenta a capacidade de transferência de energia e melhora a estabilidade do sistema. Entretanto, essa compensação causa o aumento do nível de curto circuito, pode causar ressonância subsíncrona nos geradores e traz uma série de desafios para os sistemas de proteção e localização de faltas como a inversão de tensão, a inversão de corrente e as componentes sub-harmônica. A alteração da reatância longitudinal da LT e as oscilações de frequência sub-harmônicas causadas pelos BCSs podem afetar algoritmos de proteção e localização de falta da LT. Os Bancos de Capacitores Série – BCSs – também podem gerar transientes com componentes de alta frequência, mas os filtros analógicos e digitais conseguem filtrar facilmente esses componentes (ALTUVE *et al.*, 2009).

Figura 25 – Localização do BCS em relação aos TPs.

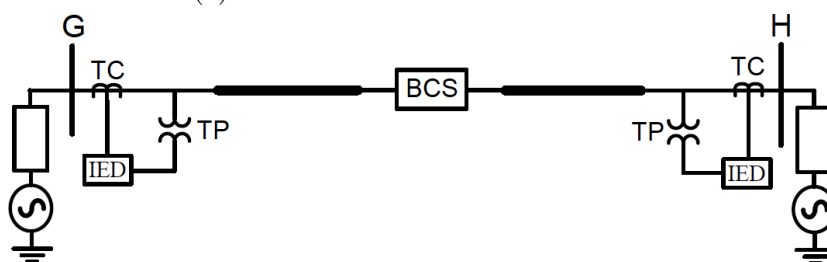
(a) BCS localizado na extremidade da LT fora da zona entre os TPs.



(b) BCS localizado na extremidade da LT dentro zona entre os TPs.



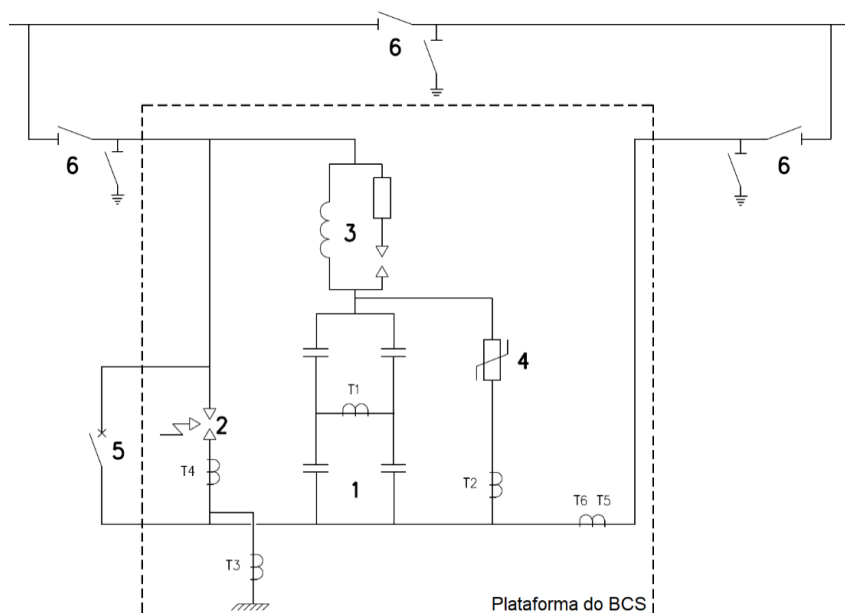
(c) BCS localizado no meio da LT.



Fonte: Bains e Zadeh (2016)

Os bancos de capacitores podem ser instalados ao longo da LT, em uma extremidade

Figura 26 – Diagrama Unifilar dos BCSs da LT 500 kV Serra da Mesa 2/Luziânia.



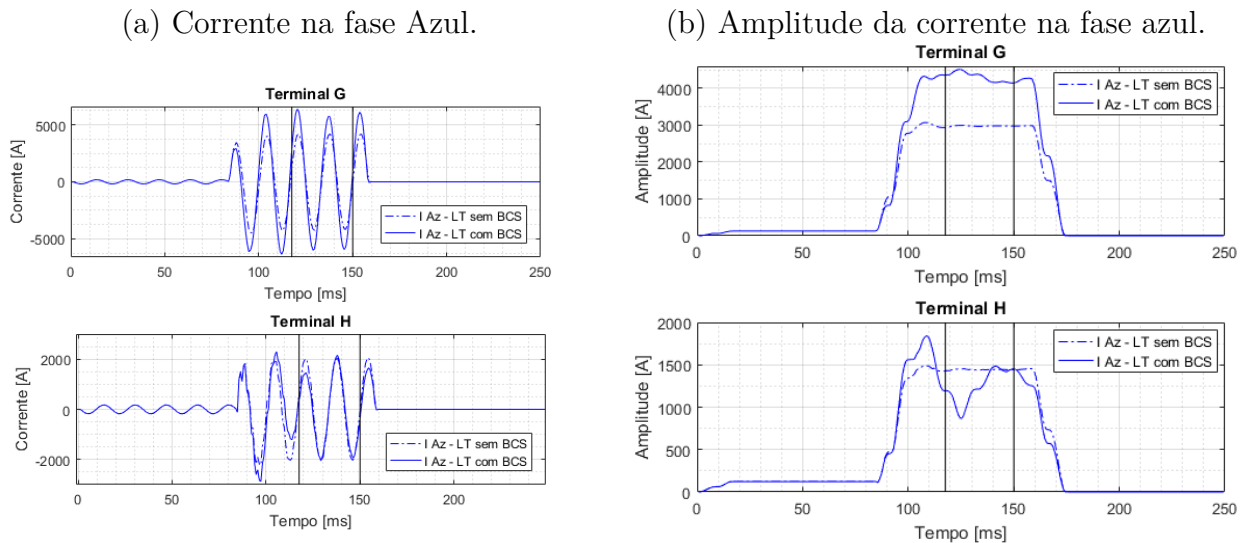
Fonte: Nokian Capacitors (2007).

da LT ou nas duas extremidades da LT (ZIEGLER, 2011). As extremidades da linha, Figura 25a-b, são locais típicos, porque é possível usar o espaço disponível na subestação, reduzindo custo de instalação. Outra possibilidade é instalar os BCSs em algum local central da LT, conforme mostrado na Figura 25c (ALTUVE *et al.*, 2009). Os BCSs utilizados nas simulações estão instalados nas extremidades da LT, conforme mostrado na Figura 7, mas foram inseridos nas simulações apenas nesta seção.

Os BCSs exigem a aplicação de *Spark Gaps* e ou Varistor de Óxido de Metal – *MOV* – para reduzir ou eliminar sobretensões nos capacitores. O *Spark Gaps* é utilizado para remover o capacitor quando a tensão excede um determinado valor, mas pode não disparar em faltas de corrente baixa. Os *MOVs* limitam a tensão e alteram a impedância do BCS de maneira não linear, mas não o remove completamente. Alguns esquemas incluem monitoramento de energia *MOV*, coordenando o by-pass do BCS quando o nível de energia do *MOV* excede um valor determinado (ALTUVE *et al.*, 2009). O Diagrama Unifilar do BCS utilizado nas simulações está apresentado na Figura 26, que mostra os principais componentes do BCS. A atuação das proteções dos BCSs com disparo do *Spark Gap* e do disjuntor de *bypass* não foi implementada no modelo utilizado.

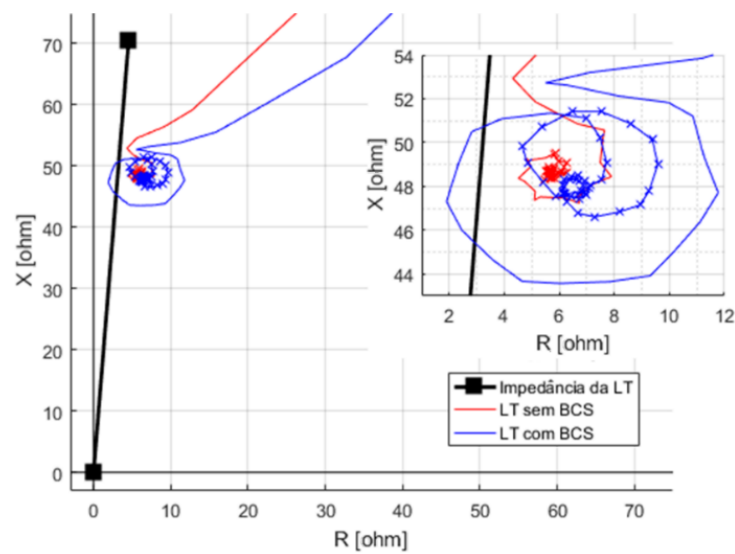
Faltas em LTs compensadas com BCS podem provocar oscilação transitória do circuito L-C-R inserindo uma frequência sub-harmônica de 10 Hz a 40 Hz e componente *DC* de decaimento exponencial sobrepostas à componente fundamental das grandezas de tensão e de corrente (ZIEGLER, 2011). Esse fenômeno pode ser observado no resultado da simulação, apresentado na Figura 27a, que apresenta as contribuições dos terminais G e H com e sem os BCSs inseridos. A componente sub-harmônica pode ser observada na

Figura 27 – Comparação das correntes dos terminais com, e sem, os BCSs. Faltas monofásicas a 30% da LT Transposta, Sistema Homogêneo, $\theta = 0^\circ$, $R_F = 5 \Omega$ e aplicadas no instante de tempo do pico de tensão.



Fonte: Autor.

Figura 28 – Efeito da oscilação sub-harmônica na impedância vista pelo terminal H. Faltas monofásicas a 30% da LT Transposta, Sistema Homogêneo, $\theta = 0^\circ$, $R_F = 5 \Omega$ e aplicadas no instante de tempo do pico de tensão.



Fonte: Autor.

oscilação dos valores de pico da corrente de falta, [Figura 27a](#), que provoca distorções na amplitude dos fasores de corrente conforme apresentado na [Figura 27b](#).

A oscilação sub-harmônica causa um transitório em forma de espiral convergindo para a impedância do estado permanente de falta, com períodos alternados de sub e sobrealcance ([ZIEGLER, 2011](#)). A [Figura 28](#) mostra esse transitório na impedância vista pelo terminal H sem o BCS inserido, em vermelho, e com o BCS inserido, em azul. Observa-

se que a impedância converge rapidamente para o ponto de falta quando o BCS está fora de operação. Quando o BCS está inserido, a oscilação sub-harmônica causa um transitório em forma de espiral. As impedâncias correspondentes ao intervalo delimitado pelos cursores pretos da [Figura 27](#) estão marcadas com “x”. Nesse intervalo, a oscilação corresponde a 7% da impedância da LT quando os BCSs estão em operação.

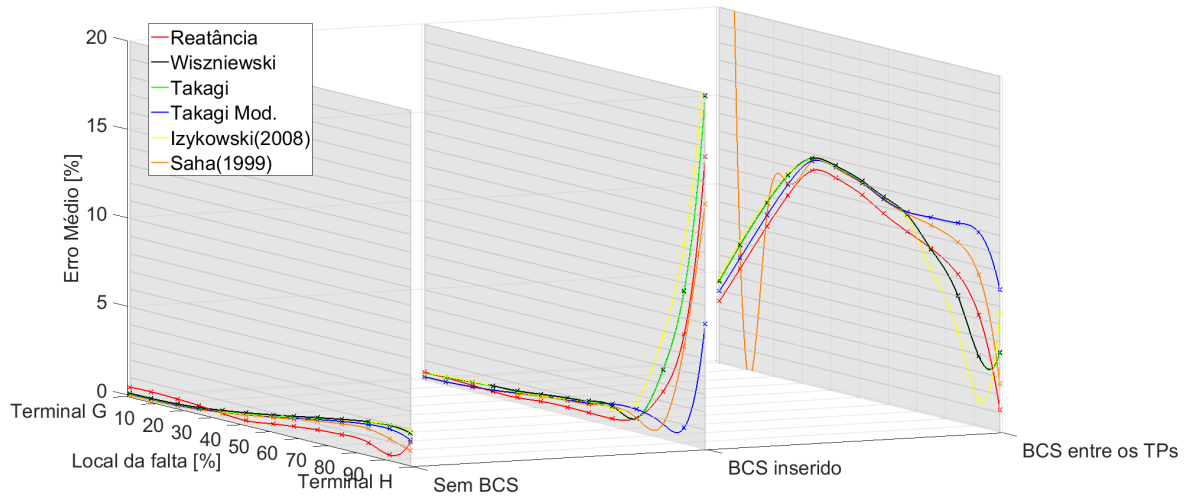
A localização dos BCSs em relação ao Transformador de Potencial – TP – é um fator determinante na decisão da aplicação dos algoritmos de localização de faltas. Quando o BCS está localizado nas extremidades da LT e os TPs estão localizados no lado da linha, como mostrado na [Figura 25a](#), o BCS está fora da zona entre os TPs. Os ABFs podem ser aplicados nesse cenário, porque a diferença de tensão do BCS não está incluída na tensão medida pelo TP (BAINS; ZADEH, 2016).

A [Figura 29](#) e a [Figura 30](#) mostram o desempenho dos ABFs aplicados nessa configuração, considerando $R_F = 5\ \Omega$ e os BCSs inseridos. Os algoritmos de um terminal apresentam erros inferiores a 2% para faltas em até 65% da LT. Os algoritmos de dois terminais apresentam erros abaixo de 1,5%. Observa-se que a utilização da mediana dos resultados, encontrados no período estacionário de falta, reduz o impacto das distorções provocadas pela oscilação transitória do Circuito LCR.

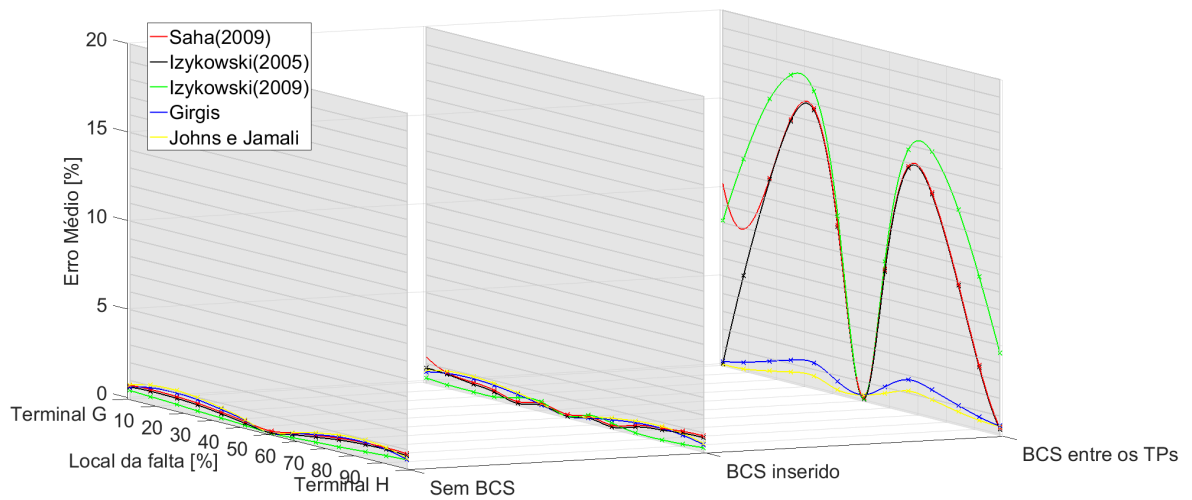
A [Figura 29](#) e a [Figura 30](#) também mostram o desempenho dos ABFs para a configuração: BCS localizado na extremidade da LT dentro zona entre os TPs. Os ABFs de um terminal perdem o desempenho com erros superiores a 20%. Os ABFs de dois terminais também são afetados com erros de até 20%, em alguns casos.

Figura 29 – Efeito dos BCSs nos ABFs: Faltas monofásicas aplicadas ao longo da LT, Sistema Homogêneo, $\theta = 0^\circ$, $R_F = 5 \Omega$ e aplicadas no instante de tempo do pico de tensão.

(a) ABFs de Um Terminal.



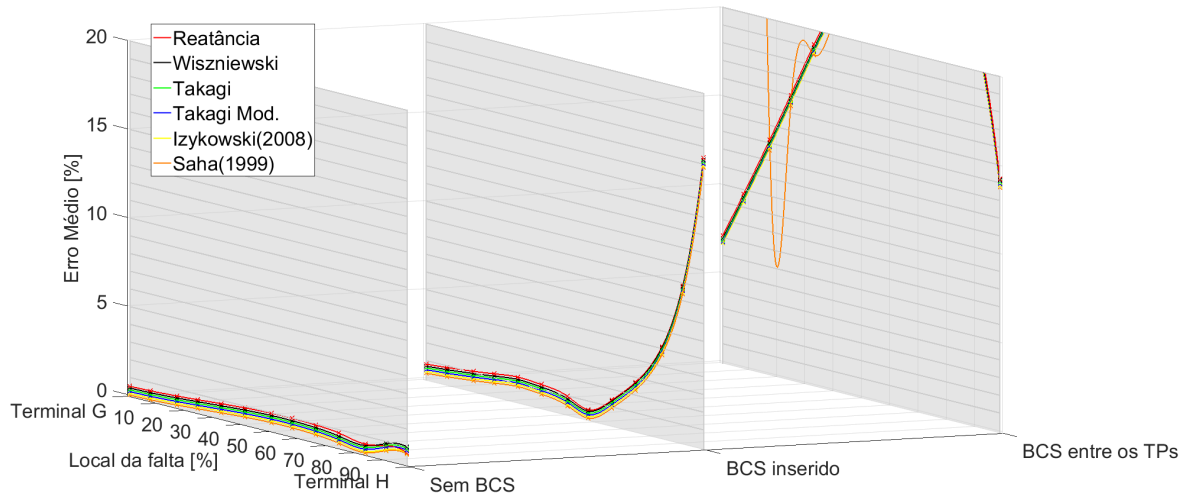
(b) ABFs de Dois Terminais.



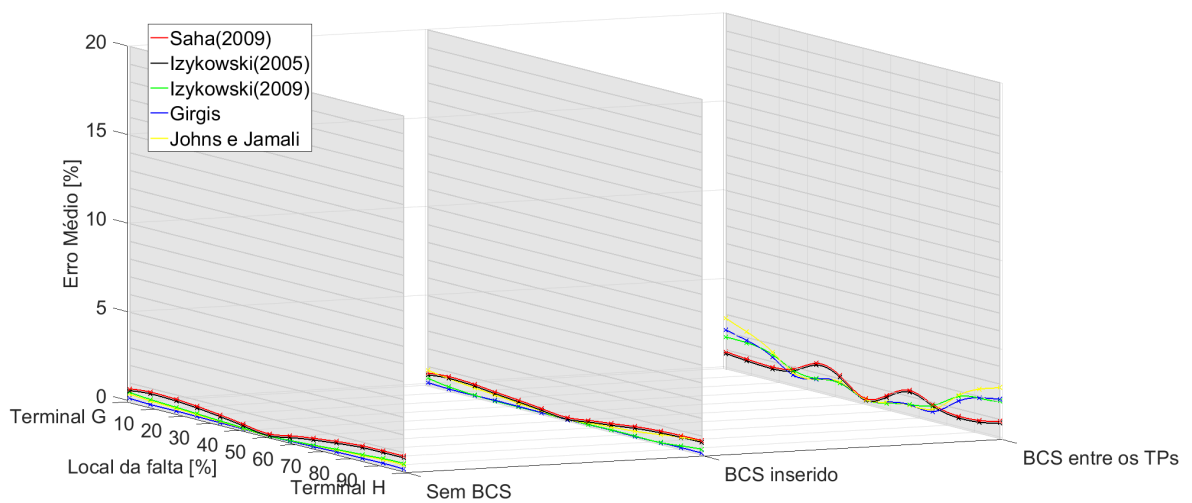
Fonte: Autor.

Figura 30 – Efeito dos BCSs nos ABFs: Faltas bifásicas aplicadas ao longo da LT, Sistema Homogêneo, $\theta = 0^\circ$, $R_F = 5\Omega$ e aplicadas no instante de tempo do pico de tensão.

(a) ABFs de Um Terminal.



(b) ABFs de Dois Terminais.



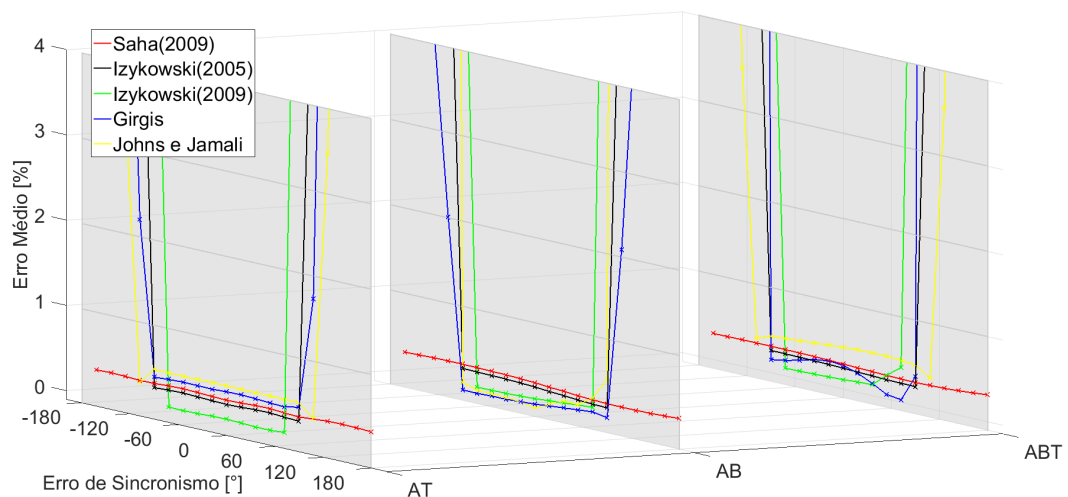
Fonte: Autor.

4.7 Efeito do Erro de sincronismo no desempenho dos ABFs

As amostras de tensão e de corrente dos terminais podem apresentar erros de sincronismo devido à diferença na taxa de amostragem, ao deslocamento de fase causado pelos transformadores de tensão e corrente, às falhas nos dispositivos de sincronização por GPS e outros. Os ABFs de dois terminais, apresentados neste trabalho, apresentam soluções para correção de possíveis erros de sincronismo entre os terminais da LT.

Foram introduzidos erros de sincronismo de -180° a 180° entre os terminais G e H, para análise do desempenho dos ABFs nessas condições. O algoritmo (SAHA *et al.*, 2009) não apresenta variação significativa no resultado, conforme apresentado na Figura 31. Os algoritmos Izykowski *et al.* (2005) e Izykowski *et al.* (2011) também são robustos para erros de sincronismo, mas estão limitados à faixa de erro de -90° a 90° e de -75° a 75° , respectivamente. Essa margem de erro possibilita a sincronização manual dos sinais. Nesse trabalho, os algoritmos Girgis *et al.* (1992) e Johns e Jamali (1990) estão utilizando o operador de sincronização calculado pelo algoritmo Izykowski *et al.* (2005) e, portanto, apresentam a mesma faixa de tolerância de erro de sincronismo.

Figura 31 – Efeito do erro de sincronismo nos ABFs: Falhas monofásicas ($R_F = 50 \Omega$), faltas bifásicas ($R_F = 5 \Omega$) e bifásicas terra ($R_F = 10 \Omega$) aplicadas a 40% da LT Transposta, Sistema Homogêneo, $\theta = 0^\circ$, $R_F = 0 \Omega$, aplicadas no instante de tempo do pico de tensão e com erro de sincronismo variando de -180° a 180° .



Fonte: Autor.

4.8 Aplicação dos ABFs no Modelo do Sistema Elétrico Real

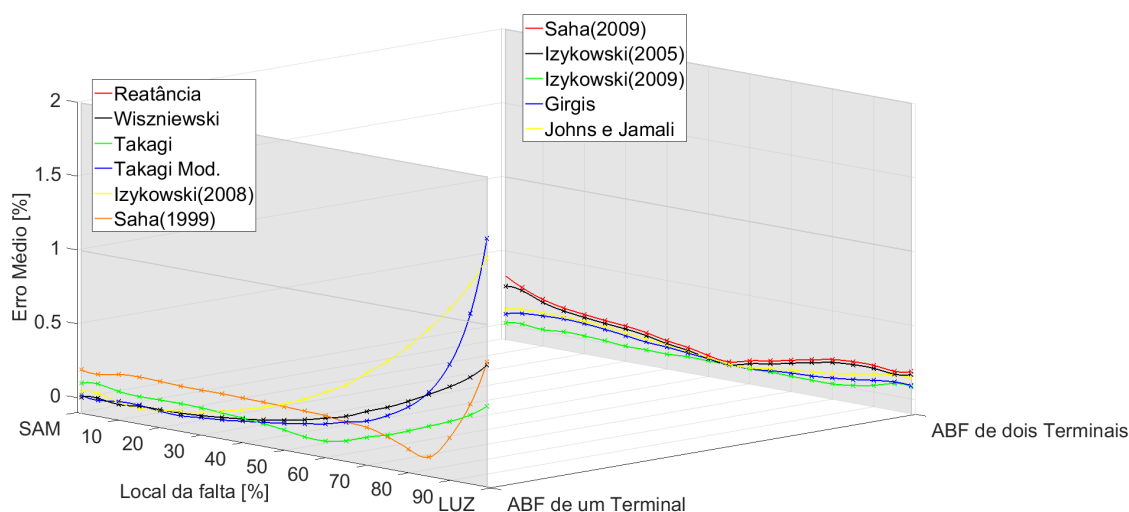
Esta seção apresentará o desempenho dos algoritmos de localização de faltas com base em fasores aplicados em casos de faltas simuladas em LTs de EAT com diferentes características e que compõem a interligação norte-sul do SIN. As LTs estão inseridas no modelo elétrico real apresentado na Figura 12 da seção 3.5. Serão realizadas simulações de faltas na LT 500 kV Serra da Mesa 2/Luziânia, na LT 500 kV Samambaia/Luziânia e na LT 500 kV Samambaia/Emborcação.

4.8.1 Resultados dos ABFs em faltas simuladas ao longo de uma LT curta

A LT 500 kV Samambaia/Luziânia é uma LT curta de 67 km de comprimento em circuito simples, que entrou em operação em 2008 e interliga as subestações de transmissão SE Samambaia e SE Luziânia. A geometria predominante das torres dessa LT está mostrada na Figura 8. A LT possui quatro condutores por fase e dois cabos para-raios. Os dados geométricos, tipos de cabos e outros dados necessários para a simulação estão mostrados no APÊNDICE A.

A Figura 32 mostra o resultado da simulação para faltas monofásicas francas, resistência de falta de 0Ω , ângulo de carga de zero graus e aplicadas no pico de tensão. Os ABF de dois terminais tiveram um ótimo desempenho com erros inferiores a 0,4% em todos os casos. Observa-se uma perda de desempenho nos ABF de um terminal nas regiões próximas ao terminal remoto.

Figura 32 – Faltas Monofásicas aplicadas ao longo da LT 500 kV Samambaia/Luziânia, Modelo do Sistema Elétrico Real, $\theta = 0^\circ$, $R_F = 15 \Omega$ e aplicadas no instante de tempo de pico de tensão.

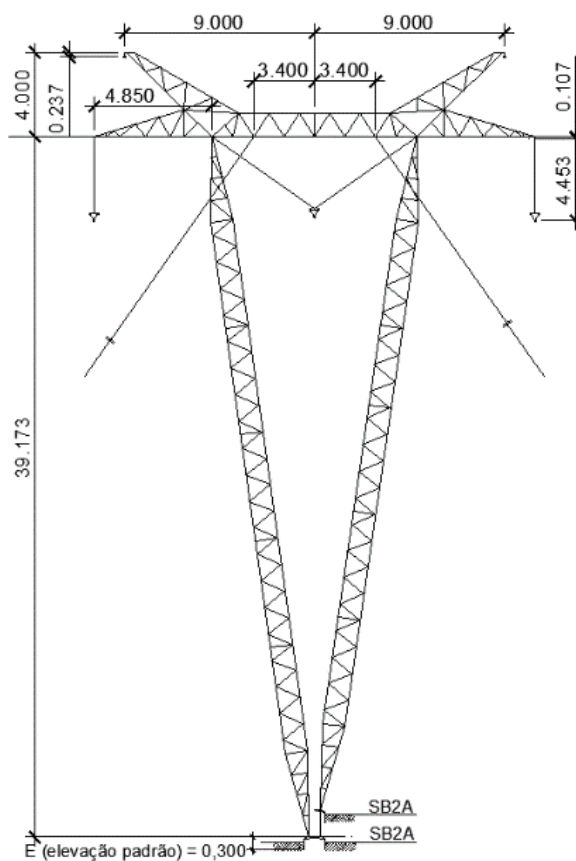


Fonte: Autor.

4.8.2 Resultados dos ABFs na simulação de religamento sob falta em uma LT longa com compensação *shunt*

A LT 500 kV Samambaia/Emborcação é uma linha longa com o comprimento de 285,41 km em circuito simples, com reatores *shunt* em ambos os terminais, interliga a subestação de transmissão SE Samambaia e a Usina Hidrelétrica de Emborcação e entrou em operação em 2002. A geometria predominante das torres dessa LT está mostrada na Figura 33. A LT possui três condutores por fase e dois cabos para-raios. Os dados geométricos, tipos de cabos e outros dados necessários para a simulação estão mostrados no APÊNDICE A.

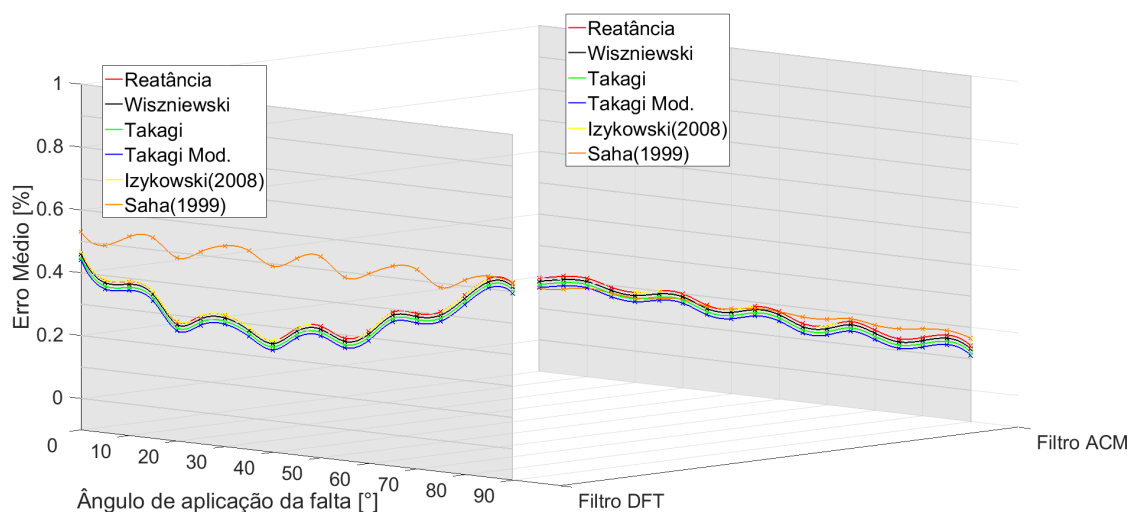
Figura 33 – Geometria das torres predominantes da LT 500 kV Samambaia/Emborcação.



Fonte: ETEE (2001).

A Figura 34 mostra o resultado da simulação para faltas trifásica-terra franca durante um religamento sob falta a 50% da SE Samambaia. Nesse exemplo, existem apenas os dados do terminal da SE Samambaia, pois o terminal da SE Emborcação está aberto, o que inviabiliza a aplicação dos algoritmos de dois terminais. Os ABF de um terminal tiveram erros inferiores a 0,55%. A utilização do algoritmo ACM, para filtrar a componente *DC* de decaimento exponencial, reduziu o erro em, aproximadamente, 0,25%, quando comparado aos resultados obtidos com a utilização do filtro *DFT*.

Figura 34 – Simulação do religamento sob falta trifásica a 50% da LT 500 kV Samambai-a/Emborcação, Modelo do Sistema Elétrico Real e $R_F = 1 \Omega$.



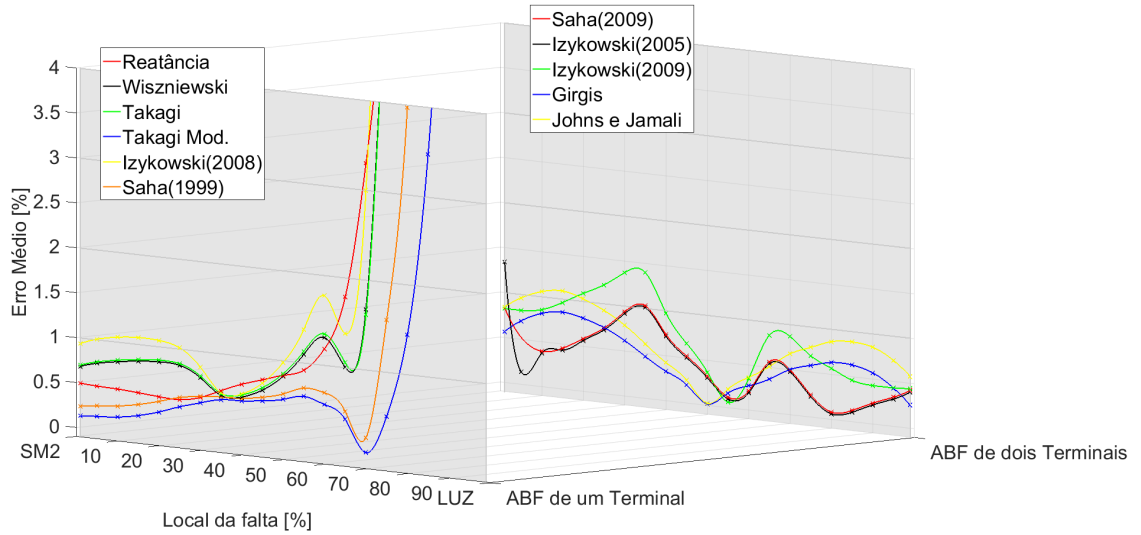
Fonte: Autor.

4.8.3 Resultados dos ABFs em faltas simuladas ao longo de uma LT longa com compensação série e *shunt*

A LT 500 kV Serra da Mesa 2/Luziânia é uma linha longa de 313,8 km comprimento em circuito simples, com compensação série e reatores shunt nos dois terminais e TPs instalados nos terminais da LT. A LT interliga as subestações de transmissão SE Serra da Mesa 2 e SE Luziânia e está em operação desde 2008. A geometria predominante das torres está mostrada na Figura 8. A LT possui quatro condutores por fase e dois cabos para-raios. Os dados geométricos, tipos de cabos e outros dados necessários para a simulação estão mostrados no APÊNDICE A.

A Figura 35 mostra o resultado da simulação para faltas monofásicas, resistência de falta de 15Ω , ângulo de carga de zero graus e aplicadas no ponto de pico de tensão. Os compensadores série e *shunt* estavam em operação. Os algoritmos de um terminal obtiveram bons resultados com erros inferiores a 1% para faltas em até 50% da LT. Os algoritmos de dois terminais obtiveram bons desempenhos com erros inferiores a 1,5% em todos os casos.

Figura 35 – Falhas monofásicas aplicadas ao longo da LT 500 kV Serra da Mesa 2/Luziânia com os BCSs e Reatores em operação, Modelo do Sistema Elétrico Real, $\theta = 0^\circ$, $R_F = 15 \Omega$ e aplicadas no instante de tempo do pico de tensão.



Fonte: Autor.

4.9 Considerações finais

O algoritmo da [Reatância](#) apresentou erros relacionados à resistência de falta, à corrente de carga e à não homogeneidade do sistema. Os demais ABFs de um terminal apresentam recursos para reduzir essas fontes de erros, apresentando bons resultados quando comparados ao algoritmo da reatância, perdendo o desempenho em alguns casos de faltas próximas ao terminal remoto. A variação da resistividade do solo impacta o desempenho dos algoritmos de um terminal nos casos de faltas monofásicas.

Os ABFs de dois terminais eliminam essas fontes de erros. O algoritmo [Izykowski et al. \(2011\)](#) utiliza o modelo de linha longa e, em geral, apresenta resultados mais precisos que os algoritmos [Saha et al. \(2009\)](#) e [Izykowski et al. \(2005\)](#). Entretanto, o algoritmo [Izykowski et al. \(2011\)](#) é mais sensível aos erros de sincronismo.

Os ABFs reduzem o desempenho quando aplicados às LTs não Transpostas e, exceto os algoritmos [Saha et al. \(1999\)](#), [Girgis et al. \(1992\)](#) e [Johns e Jamali \(1990\)](#). Em geral, as estimativas de localização obtidas nos casos de LTs transpostas por seguimento apresentam resultados satisfatórios quando comparados aos resultados para LTs não transposta, mas, em alguns casos, apresentam erros elevados. Nesses casos, o algoritmo [Girgis et al. \(1992\)](#) performou melhor por considerar essa característica na formulação utilizada nesse trabalho.

A aplicação dos ABFs apresentados em LTs com BCSs só é possível se estiverem instalados nos terminais da LT e fora da zona delimitada pelos TPs. Entretanto, mesmo nesse caso, o surgimento de componentes sub-harmônicas e componente *DC* de decaimento exponencial nos transitórios das faltas pode causar erros significativos nos ABFs.

A componente *DC* de decaimento exponencial e as componentes sub-harmônicas geradas nos transitórios impactam o desempenho dos algoritmos de estimação de fasores e, portanto, podem impactar no desempenho dos algoritmos de localização de faltas. A aplicação de filtros para eliminar essas componentes e a utilização da mediana dos valores calculados no período estacionário de falta aprimoram a estimativa de localização.

Nos casos de erro de sincronismo, o algoritmo [Saha et al. \(2009\)](#) não apresenta variação significativa do desempenho. Os algoritmos [Izykowski et al. \(2005\)](#) e [Izykowski et al. \(2011\)](#) também são robustos para erros de sincronismo, mas estão limitados à uma faixa de erro. Nesse trabalho, os algoritmos [Girgis et al. \(1992\)](#) e [Johns e Jamali \(1990\)](#) estão utilizando o operador de sincronização calculado no algoritmo [Izykowski et al. \(2005\)](#), apresentando a mesma faixa de tolerância.

As simulações no Sistema Elétrico Real mostram que os ABFs implementados performam bem quando impostos às condições de um sistema real com diversas Linhas de Transmissão, Reatores de Linha, Reatores de Barras, Banco de Capacitores Série e MOVs.

A Tabela 3.6 apresenta um resumo das fontes de erros que afetam o desempenho

dos algoritmos de localização de falta estudados levando em consideração os resultados apresentados nesse capítulo.

Quadro 8 – Resumo das fontes de erro que afetam os algoritmos de localização de faltas.

| Fontes de erros | ABFs de Um Terminal | | | | | | ABFs de Dois Terminais | | | | |
|------------------------------------|--|--|--|--|--|--|-------------------------------------|--|--|--|--|
| | Reatância | Wiszniewski (1983) | Takagi <i>et al.</i> (1982) | Takagi Modificado | Izykowski (2008) | Saha <i>et al.</i> (1999) | Saha <i>et al.</i> (2009) | Izykowski <i>et al.</i> (2005) | Izykowski <i>et al.</i> (2011) | Girgis <i>et al.</i> (1992) | Johns e Jamali (1990) |
| 4.2 – Transposição da LT | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> ² | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> ² |
| 4.3 – Resistividade do solo | <input checked="" type="checkbox"/> ¹ | <input checked="" type="checkbox"/> ¹ | <input checked="" type="checkbox"/> ¹ | <input checked="" type="checkbox"/> ¹ | <input checked="" type="checkbox"/> ¹ | <input checked="" type="checkbox"/> ¹ | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 4.4 – Resistência de Falta | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 4.4 – Variação da carga do Sistema | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 4.4 – Não homogeneidade do Sistema | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 4.5 – Componente DC de dec. exp. | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 4.6 – Banco de Capacitor Série | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 4.7 – Sincronização de Dados | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> ³ | <input checked="" type="checkbox"/> ⁴ | <input checked="" type="checkbox"/> ³ | <input checked="" type="checkbox"/> ³ |

Fonte: Autor.

¹ Apenas em casos de faltas monofásicas.

² Apenas em casos de LTs transposta por seguimento

³ Tolerância na faixa de -90° a 90° . O cálculo do ângulo de sincronização proposto em Izykowski *et al.* (2005) foi utilizado nos algoritmos Girgis *et al.* (1992) e Johns e Jamali (1990)

⁴ Tolerância na faixa de -75° a 75°

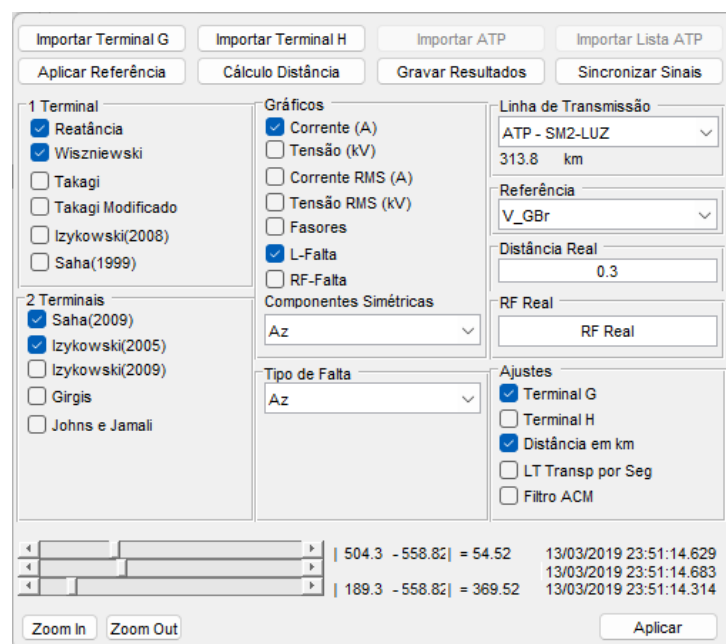
5 Apresentação e Análise dos Resultados dos casos de Faltas Reais registradas no SIN

5.1 Considerações Iniciais

Este capítulo apresentará exemplos de aplicação dos algoritmos de localização de faltas com base em fasores em faltas reais que ocorreram nas LTs de EAT em operação no SIN e que foram apresentadas na [Capítulo 3](#). Os sinais de tensão e de corrente, registrados pelos relés de proteção, serão utilizados para calcular as estimativas de localização de falta. Os parâmetros das LTs e do sistema elétrico utilizados estão apresentados no APÊNDICE A. Os resultados obtidos serão apresentados e comparados com o local real da falta identificado durante a inspeção visual das equipes de manutenção das LTs.

A [Figura 36](#) apresenta a interface gráfica do programa implementado em ambiente MATLAB® para análise das faltas simuladas pelo ATPDRAW™ e para a análise das faltas reais a partir dos arquivos COMTRADE gerados pelos relés de proteção e RDPs. Esse programa importa o formato de arquivo COMTRADE definido pela norma [IEEE Std C37.111-1999 \(1999\)](#), que é um formato usado para o intercâmbio de vários tipos de dados de faltas, testes e simulações em sistemas de energia elétrica.

Figura 36 – Interface gráfica do programa implementado em ambiente MATLAB® para análise das faltas simuladas pelo ATPDRAW™ e das faltas reais com os registros COMTRADE.



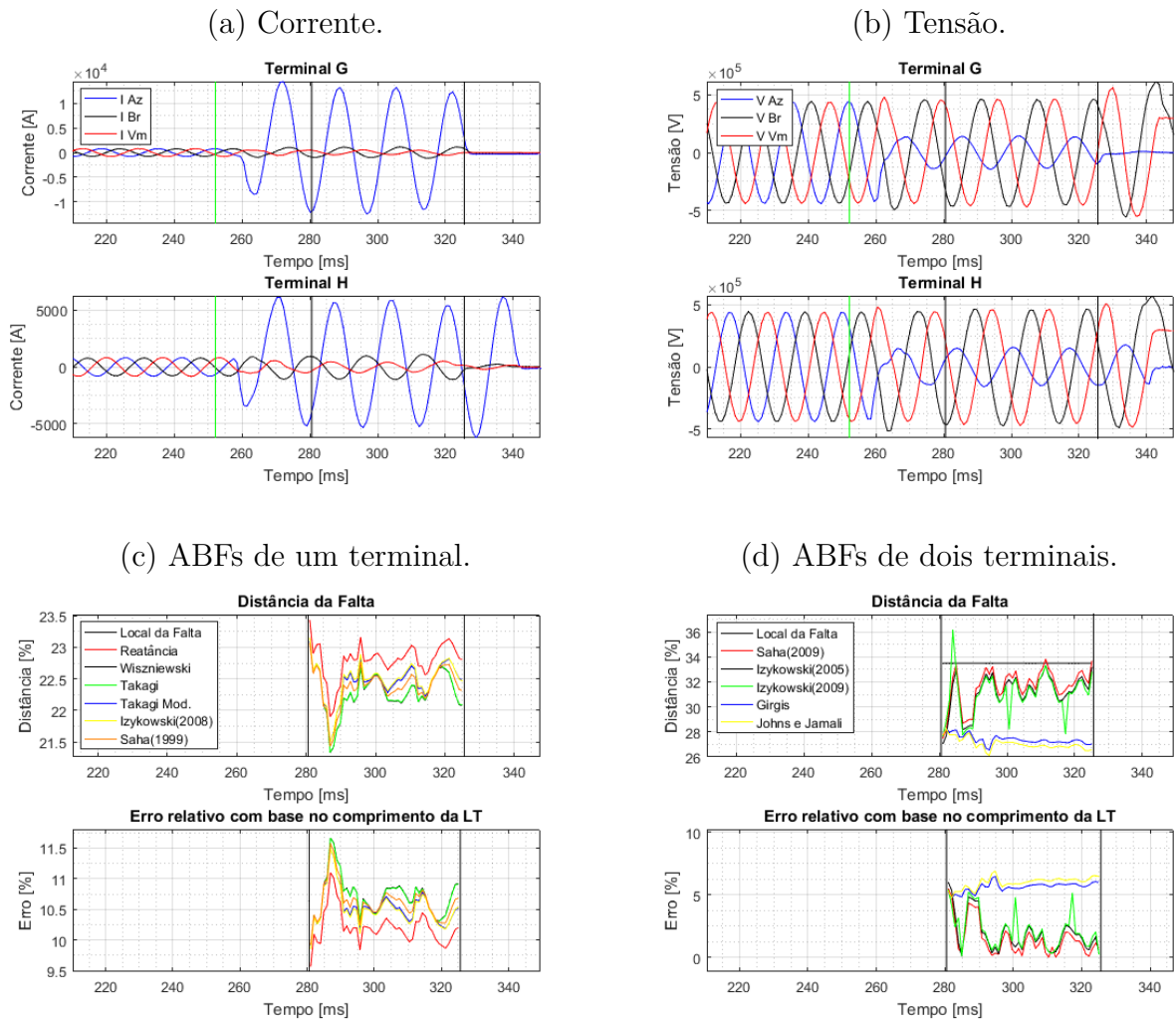
Fonte: Autor.

5.2 Estudo de Caso 1 – Falta monofásica a 33% de uma LT curta

Houve o desligamento automático da LT 500 kV Samambaia/Luziânia provocado por uma falta monofásica fase azul causada por descarga atmosférica. O local da falta foi a 22 km da SE Samambaia, que corresponde a 32,84% da LT. A resistência de falta calculada foi $0,5 \Omega$, corrente de carga de 240 A e ângulo de carga de 3° .

A Figura 37a e a Figura 37b apresentam as correntes e as tensões da LT. O intervalo da falta selecionado para estimar a localização está delimitado pelos cursores pretos. Os dados de pré-falta foram selecionados no ponto marcado pelo cursor verde. Os algoritmos de um terminal, Figura 37c, tiveram erros entre 10,17% e 10,72%. Os algoritmos de dois terminais, Figura 37d, tiveram erros de 1,78% a 6,08%.

Figura 37 – Estudo de Caso 1 – Falta monofásica fase azul na LT 500 kV Samambaia/Luziânia, causada por descarga atmosférica, a 32,84% da SE Samambaia, $\theta = 3^\circ$ e $R_F = 0,5 \Omega$.



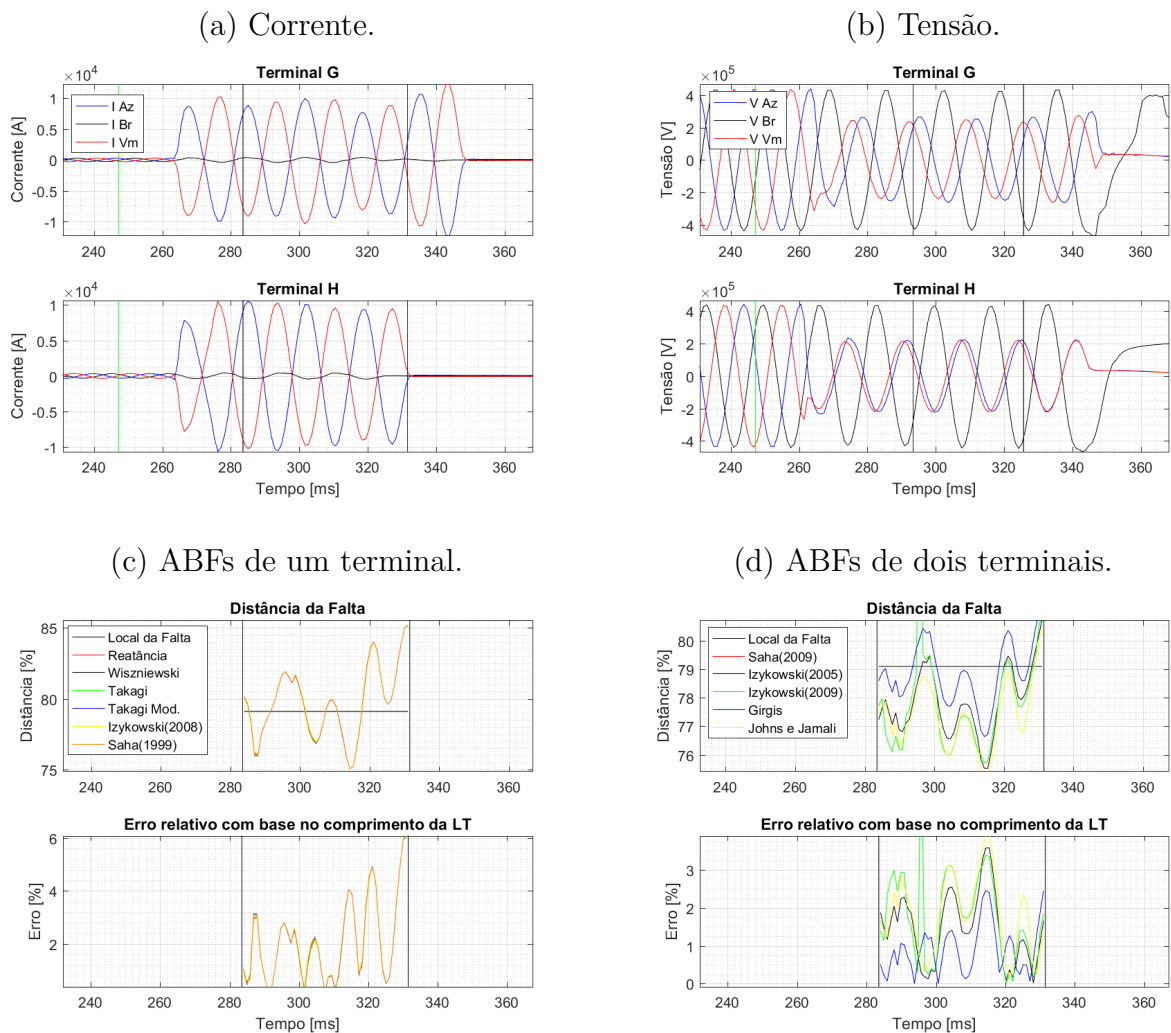
Fonte: Autor.

5.3 Estudo de Caso 2 – Falta bifásica a 79% de uma LT curta

Houve o desligamento automático da LT 500 kV Samambaia/Luziânia provocado por uma falta bifásica entre as fases azul e vermelha causada pelo toque dos condutores provocado por vento. O local da falta foi a 53 km da SE Samambaia, que corresponde a 79,10% da LT. A resistência de falta calculada foi 0Ω , corrente de carga de 200 A e ângulo de carga de $3,7^\circ$.

Os algoritmos de um terminal, Figura 38c, tiveram erros entre 0,63% e 0,69%. Os algoritmos de dois terminais, Figura 38d, tiveram erros de 0,39% a 1,87%.

Figura 38 – Estudo de Caso 2 – Falta bifásica entre as fases azul e vermelha na LT 500 kV Samambaia/Luziânia, causada por toque dos condutores provocado por vento, a 79,10% da SE Samambaia, $\theta = 3,7^\circ$ e $R_F = 0 \Omega$.



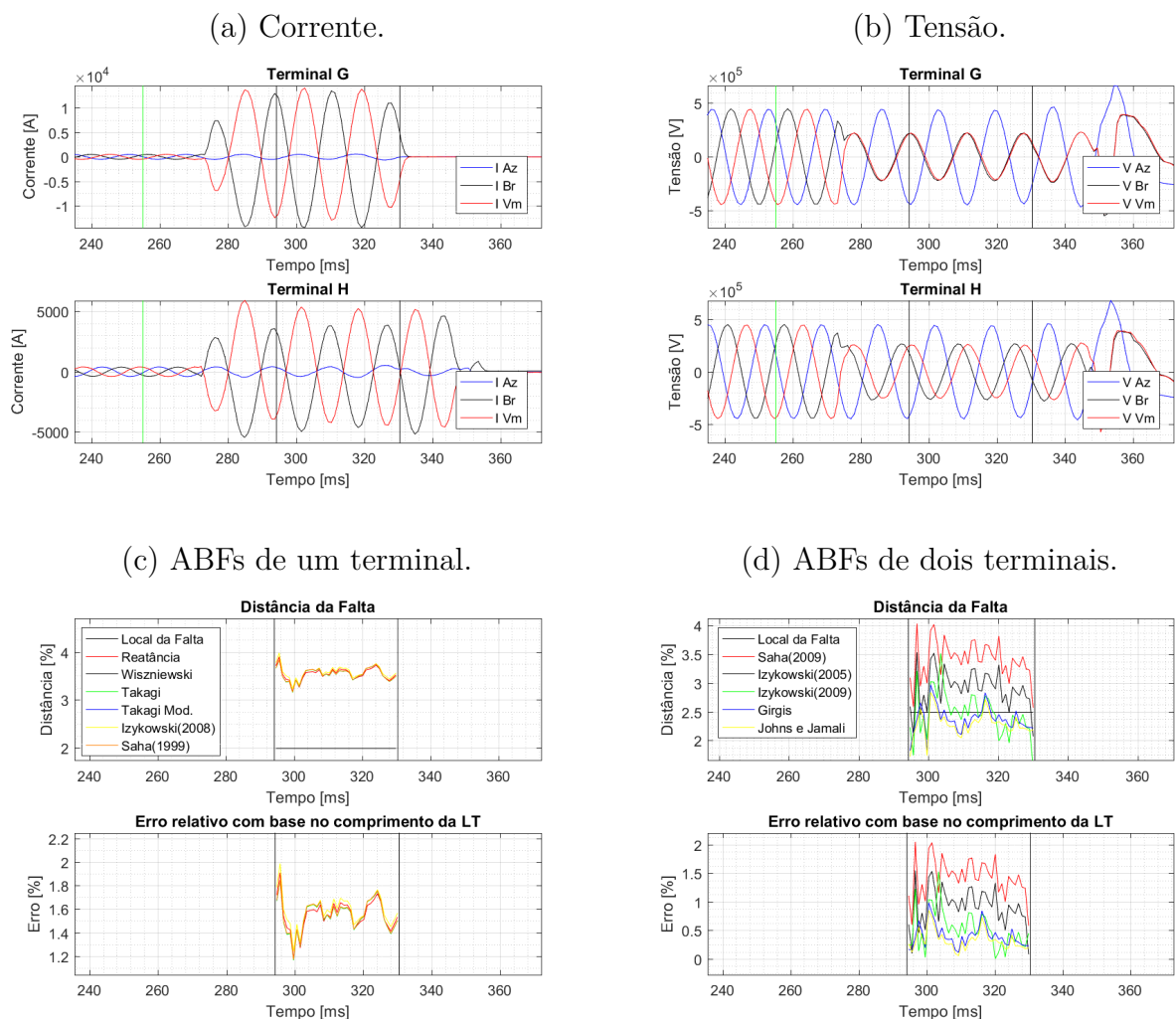
Fonte: Autor.

5.4 Estudo de Caso 3 – Falta bifásica a 2% de uma LT média

Houve o desligamento automático da LT 500 kV Luziânia/Paracatu 4 provocado por uma falta bifásica entre as fases branca e vermelha causada por queimada. O local da falta foi a 2,2 km da SE Luziânia, que corresponde a 1,99 % da LT. A resistência de falta calculada foi $0,5 \Omega$, corrente de carga de 380 A e ângulo de carga de $-1,7^\circ$.

Os algoritmos de um terminal, Figura 39c, tiveram erros de, aproximadamente, 1,5%. Os algoritmos de dois terminais, Figura 39d, tiveram erros de 0,29% a 0,92%.

Figura 39 – Estudo de Caso 3 – Falta bifásica entre as fases branca e vermelha na LT 500 kV Luziânia/Paracatu 4, causada por toque dos condutores provocado por vento, a 2% da SE Luziânia e $\theta = -1,7^\circ$ e $R_F = 0,5 \Omega$.



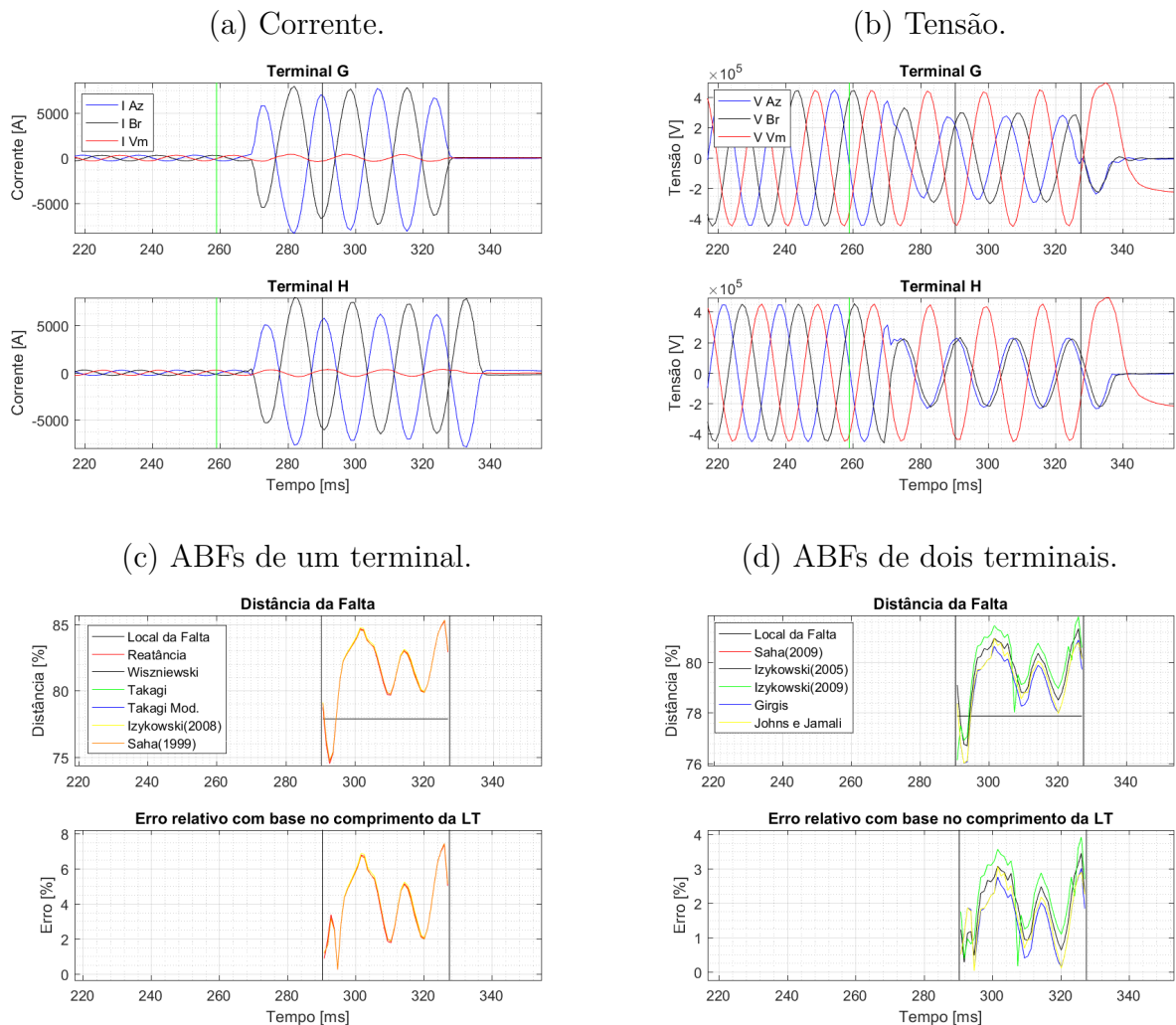
Fonte: Autor.

5.5 Estudo de Caso 4 – Falta bifásica a 78% de uma LT média

Houve o desligamento automático da LT 500 kV Luziânia/Paracatu 4 provocado por uma falta bifásica entre as fases azul e branca causada por queimada. O local da falta foi a 86,2 km da SE Luziânia, que corresponde a 77,87 % da LT. A resistência de falta calculada foi $0,5 \Omega$, corrente de carga de 200 A e ângulo de carga de 11° .

Os algoritmos de um terminal, Figura 40c, tiveram erros entre 4,20 % e 4,39 %. Os algoritmos de dois terminais, Figura 40d, tiveram erros de 1,54 % a 2,29 %.

Figura 40 – Estudo de Caso 4 – Falta bifásica entre as fases azul e branca na LT 500 kV Luziânia/Paracatu 4, causada por queimada, a 78 % da SE Luziânia, $\theta = 11^\circ$ e $R_F = 0,5 \Omega$.



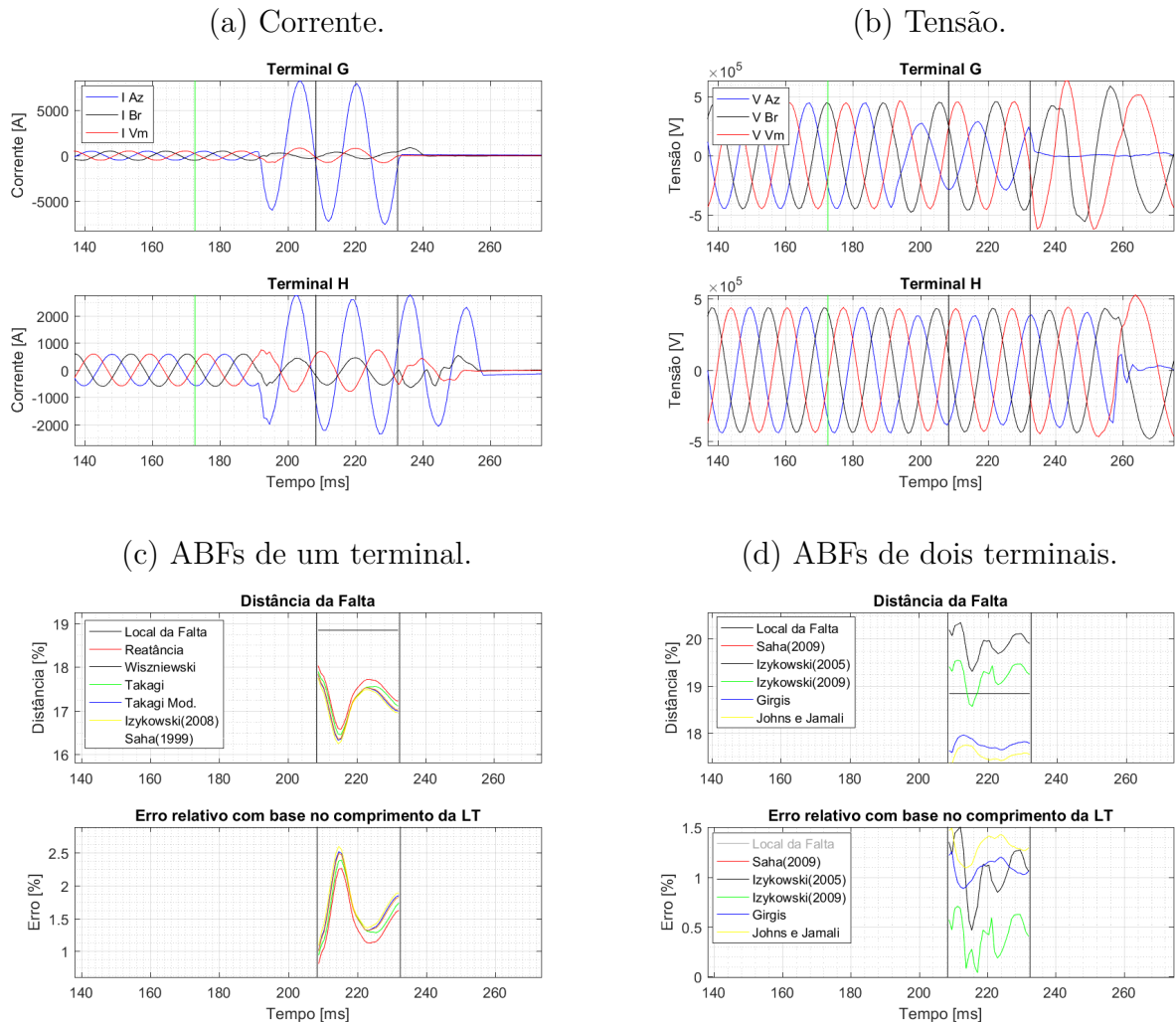
Fonte: Autor.

5.6 Estudo de Caso 5 – Falta monofásica a 19% de uma LT longa com compensação *shunt*.

Houve o desligamento automático da LT 500 kV Samambaia/Emborcação provocado por uma falta monofásica fase azul causada por queda de torre. O local da falta foi a 53 km da SE Samambaia, que corresponde a 18,84% da LT. A resistência de falta calculada foi de $2\ \Omega$, corrente de carga de 400 A e ângulo de carga de 4° .

Os algoritmos de um terminal, Figura 41c, tiveram erros entre 1,35% e 1,65%. Os algoritmos de dois terminais, Figura 41d, tiveram erros de 0,45% a 1,31%.

Figura 41 – Estudo de Caso 5 – Falta monofásica fase azul na LT 500 kV Samambaia/Emborcação, causada por queda de torre, a 19% da SE Samambaia, $\theta = 4^\circ$ e $R_F = 2\ \Omega$.

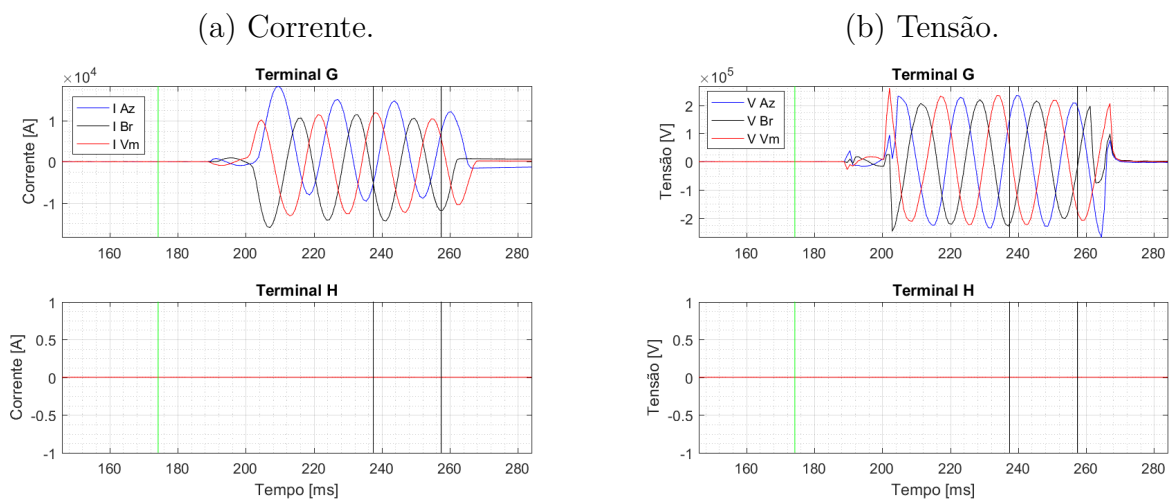


Fonte: Autor.

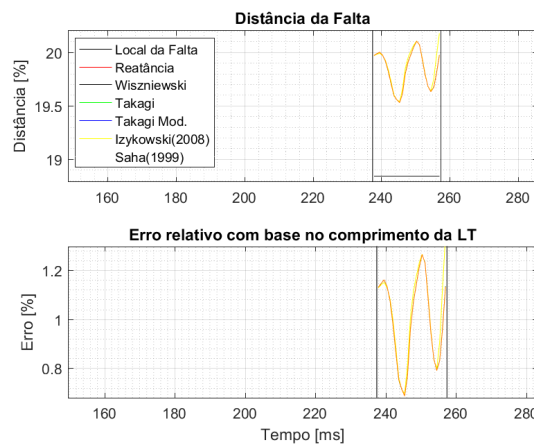
5.7 Estudo de Caso 6 – Religamento sob Falta trifásica a 19% de uma LT longa com compensação *shunt*

Houve o religamento sob falta trifásica da LT 500 kV Samambaia/Emborcação provocada por queda de torre. O local da falta foi a 53 km da SE Samambaia, que corresponde a 18,84% da LT. Os algoritmos de um terminal, Figura 42c, tiveram erros entre 0,98% e 1,08%.

Figura 42 – Estudo de Caso 6 – Religamento sob falta trifásica na LT 500 kV Samambaia/Emborcação, causada por queda de torre, a 18,84% da SE Samambaia e $R_F = 0 \Omega$.



(c) ABFs de um terminal.



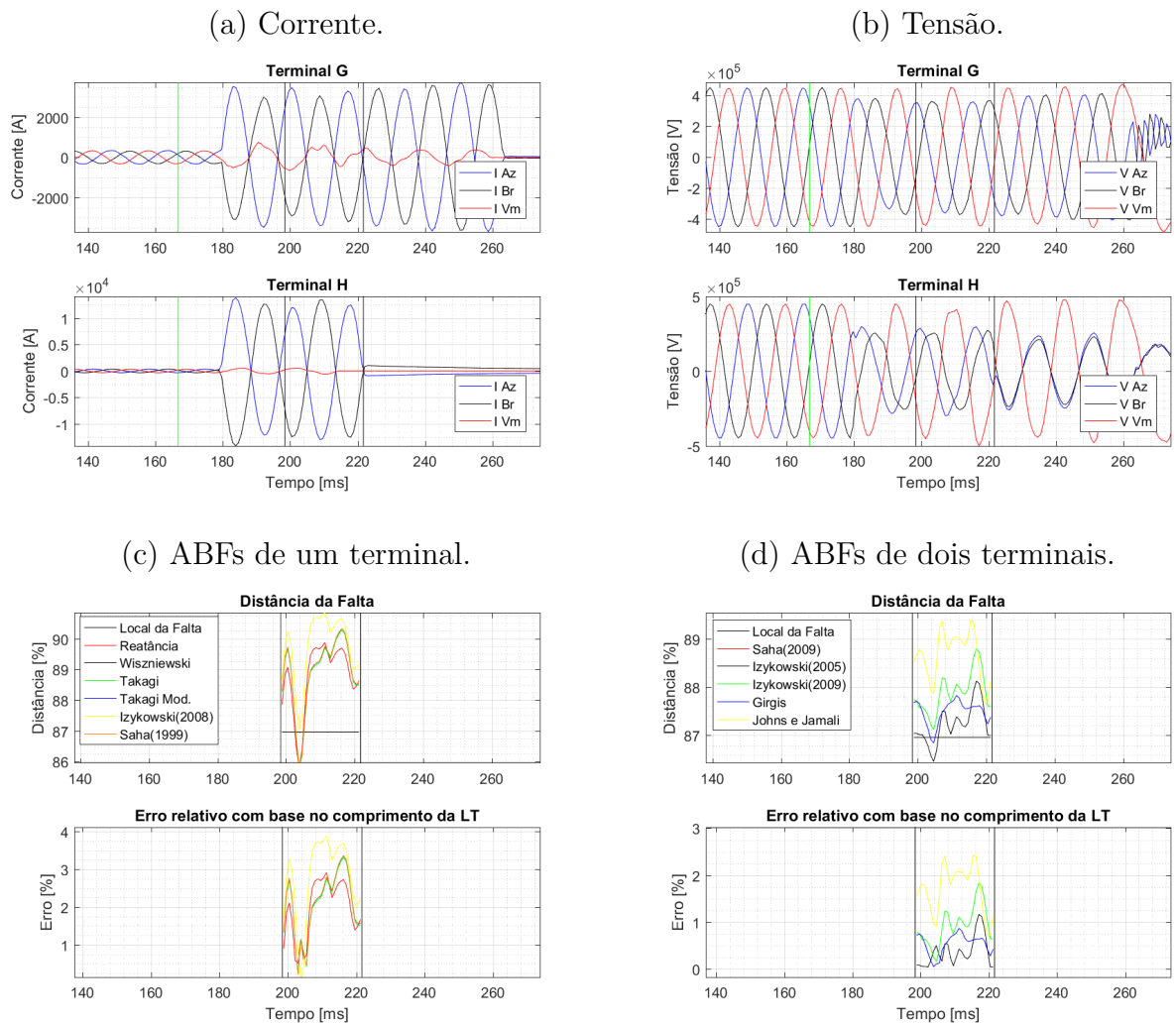
Fonte: Autor.

5.8 Estudo de Caso 7 – Falta bifásica terra a 87% de uma LT longa com compensação *shunt*

Houve o desligamento automático da LT 500 kV Samambaia/Emborcação provocado por uma falta bifásica terra entre a fase azul, a fase branca e o solo causada por contato com árvore. O local da falta foi a 248 km da SE Samambaia, que corresponde a 86,96 % da LT. A resistência de falta calculada foi de 6Ω , corrente de carga de 230 A e ângulo de carga de 3° .

Os algoritmos de um terminal, Figura 43c, tiveram erros de 2,19 % a 3,23 %. Os algoritmos de dois terminais, Figura 43d, tiveram erros de 0,23 % a 1,82 %.

Figura 43 – Estudo de Caso 7 – Falta bifásica terra entre a fase azul, a fase branca e o solo na LT 500 kV Samambaia/Emborcação, causada por contato com árvore, a 86,96 % da SE Samambaia, $\theta = 3^\circ$ e $R_F = 6 \Omega$.



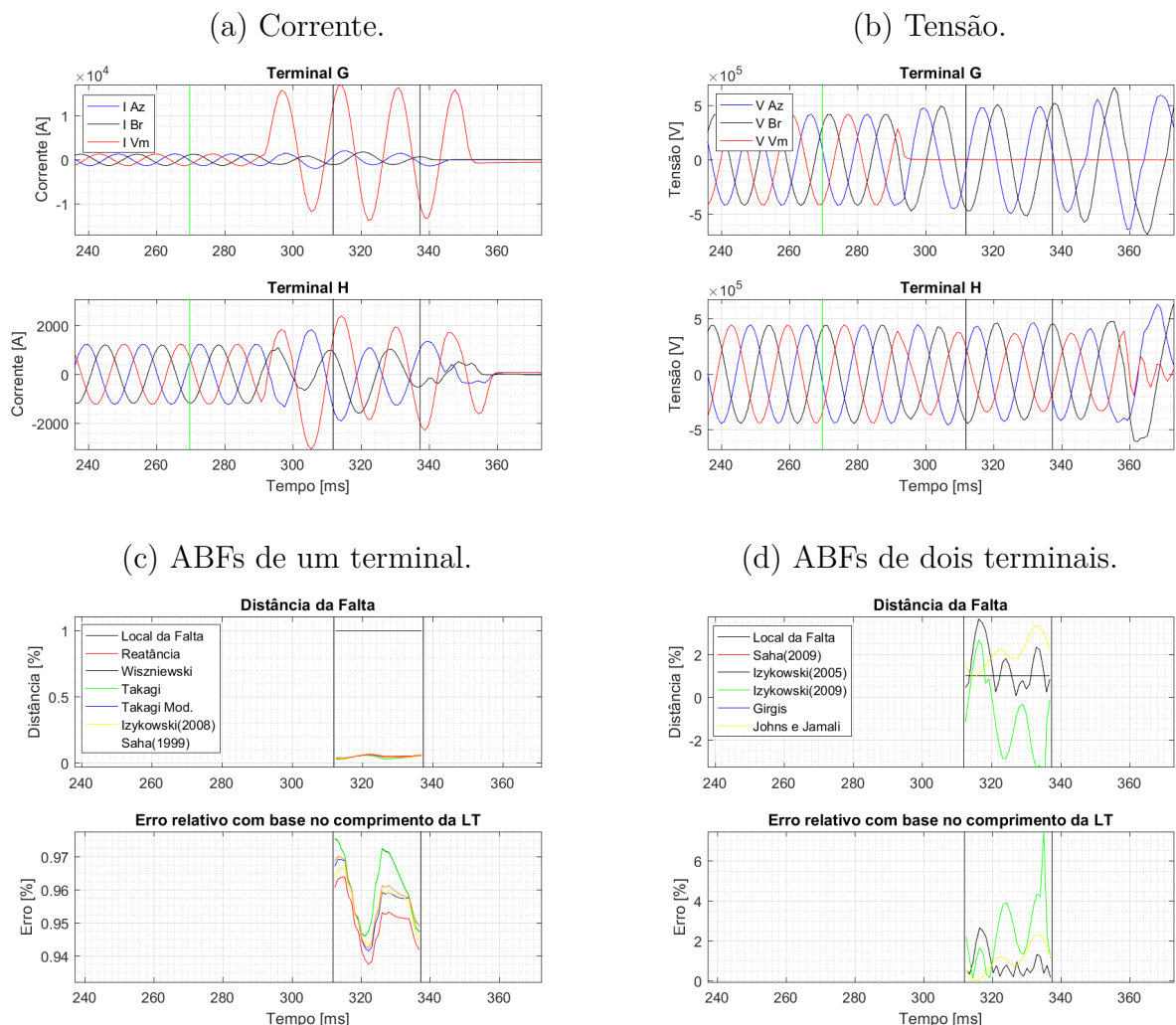
Fonte: Autor.

5.9 Estudo de Caso 8 – Falta monofásica a 0% de uma LT longa com compensação *shunt* e série

Houve o desligamento automático da LT 500 kV Serra da Mesa 2/Luziânia provocado por uma falta monofásica fase vermelha causada por contato com a estrutura. O local da falta foi a 0,3 km da SE Serra da Mesa 2, que corresponde a 0,1 % da LT. A resistência de falta calculada foi de $0\ \Omega$, corrente de carga de 900 A e ângulo de carga de 19° .

Os algoritmos de um terminal, Figura 44c, tiveram erros entre 0,95 % e 0,96 %. Os algoritmos de dois terminais, Figura 44d, tiveram erros de 0,39 % a 2,19 %.

Figura 44 – Estudo de Caso 8 – Falta monofásica fase vermelha na LT 500 kV Serra da Mesa 2/Luziânia, causada por contato com a estrutura provocado por vento, a 0,1 % da SE Serra da Mesa 2, $\theta = 18^\circ$ e $R_F = 0\ \Omega$.



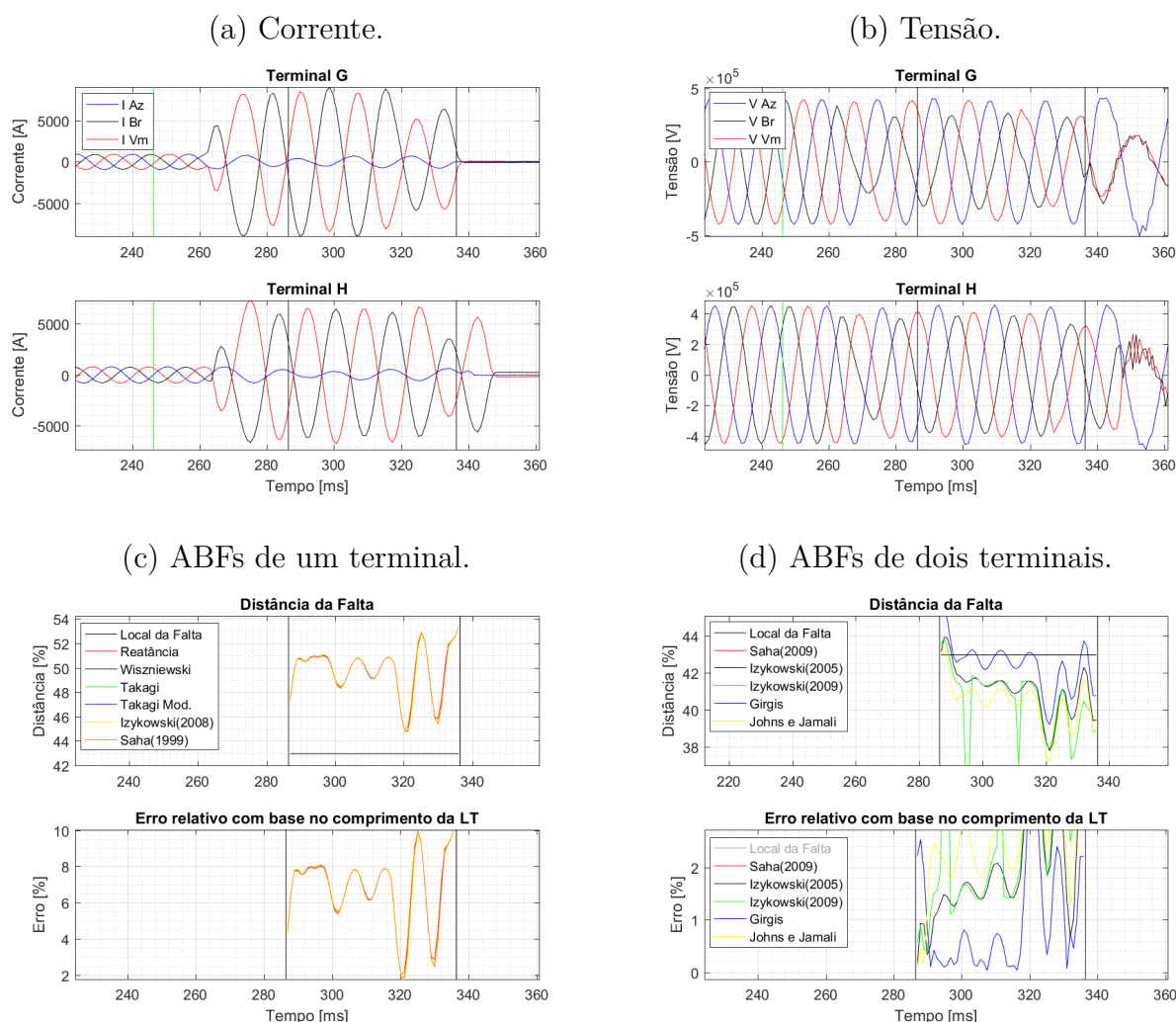
Fonte: Autor.

5.10 Estudo de Caso 9 – Falta bifásica a 43% de uma LT longa com compensação *shunt* e série

Houve o desligamento automático da LT 500 kV Serra da Mesa 2/Luziânia provocado por uma falta bifásica entre as fases branca e vermelha causada pelo toque dos condutores provocado por vento. O local da falta foi a 134,81 km da SE Serra da Mesa 2, que corresponde a 42,96 % da LT. A resistência de falta calculada foi $0,5 \Omega$, corrente de carga de 600 A e ângulo de carga de -11° .

Os algoritmos de um terminal, Figura 45c, tiveram erros entre 7,24 % e 7,31 %. Os algoritmos de dois terminais, Figura 45d, tiveram erros de 0,34 % a 2,39 %.

Figura 45 – Estudo de Caso 9 – Falta bifásica entre as fases branca e vermelha na LT 500 kV Serra da Mesa 2/Luziânia, causada pelo toque dos condutores provocado por vento, a 43 % da SE Serra da Mesa 2, $\theta = -11^\circ$ e $R_F = 0,5 \Omega$.



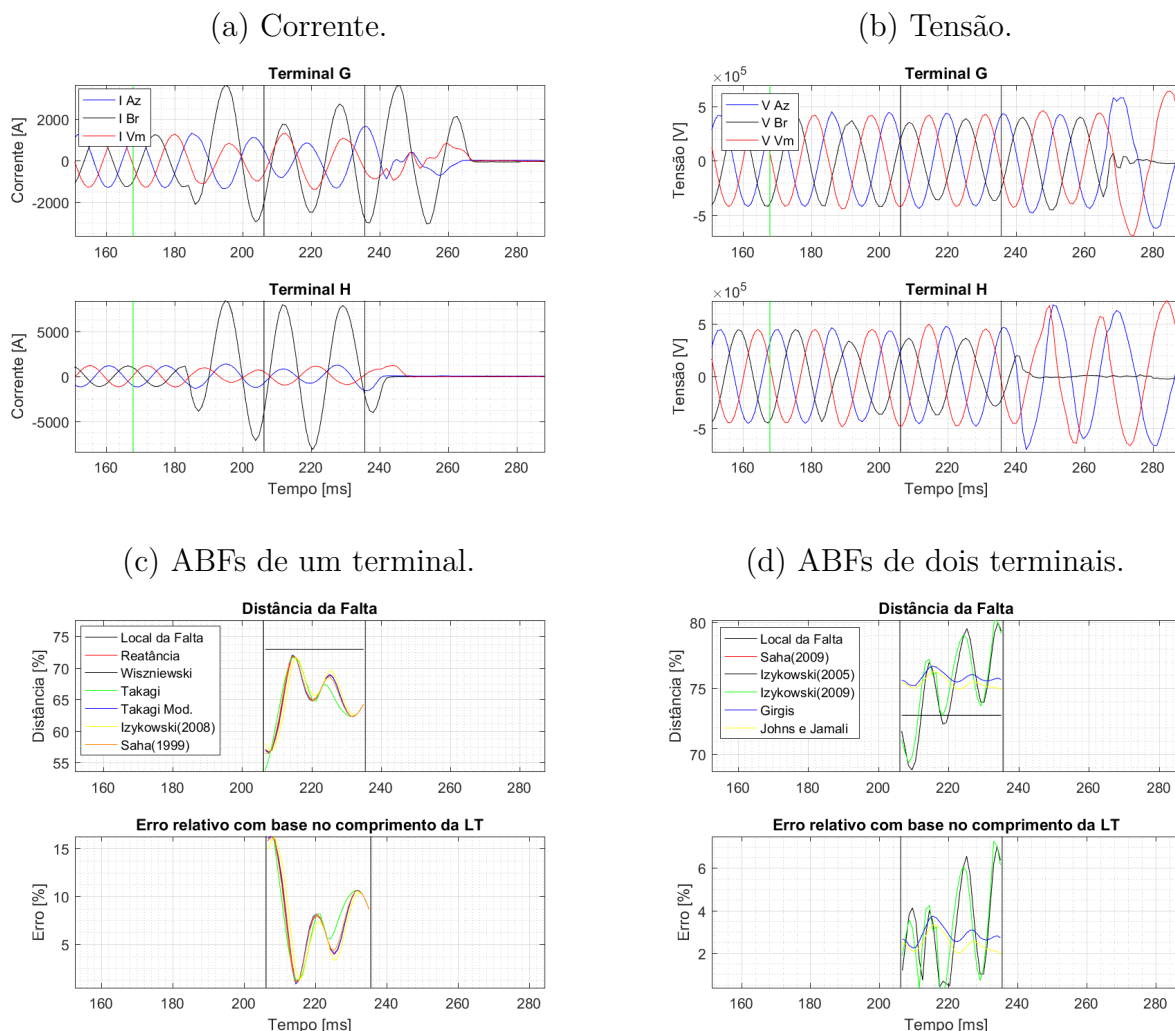
Fonte: Autor.

5.11 Estudo de Caso 10 – Falta monofásica a 73% de uma LT longa com compensação *shunt* e série

Houve o desligamento automático da LT 500 kV Serra da Mesa 2/Luziânia provocado por uma falta monofásica fase branca causada por descarga atmosférica. O local da falta foi a 228,9 km da SE Serra da Mesa 2, que corresponde a 72,94 % da LT. A resistência de falta calculada foi $0\ \Omega$, corrente de carga de 900 A e ângulo de carga de 24° .

Os algoritmos de um terminal, Figura 46c, tiveram erros entre 7,19% e 8,07%. Os algoritmos de dois terminais, Figura 46d, tiveram erros de 2% a 2,75%.

Figura 46 – Estudo de Caso 10 – Falta monofásica fase branca na LT 500 kV Serra da Mesa 2/Luziânia, provocada por descarga atmosférica, a 72,94 % da SE Serra da Mesa 2, $\theta = 24^\circ$ e $R_F = 0\ \Omega$.



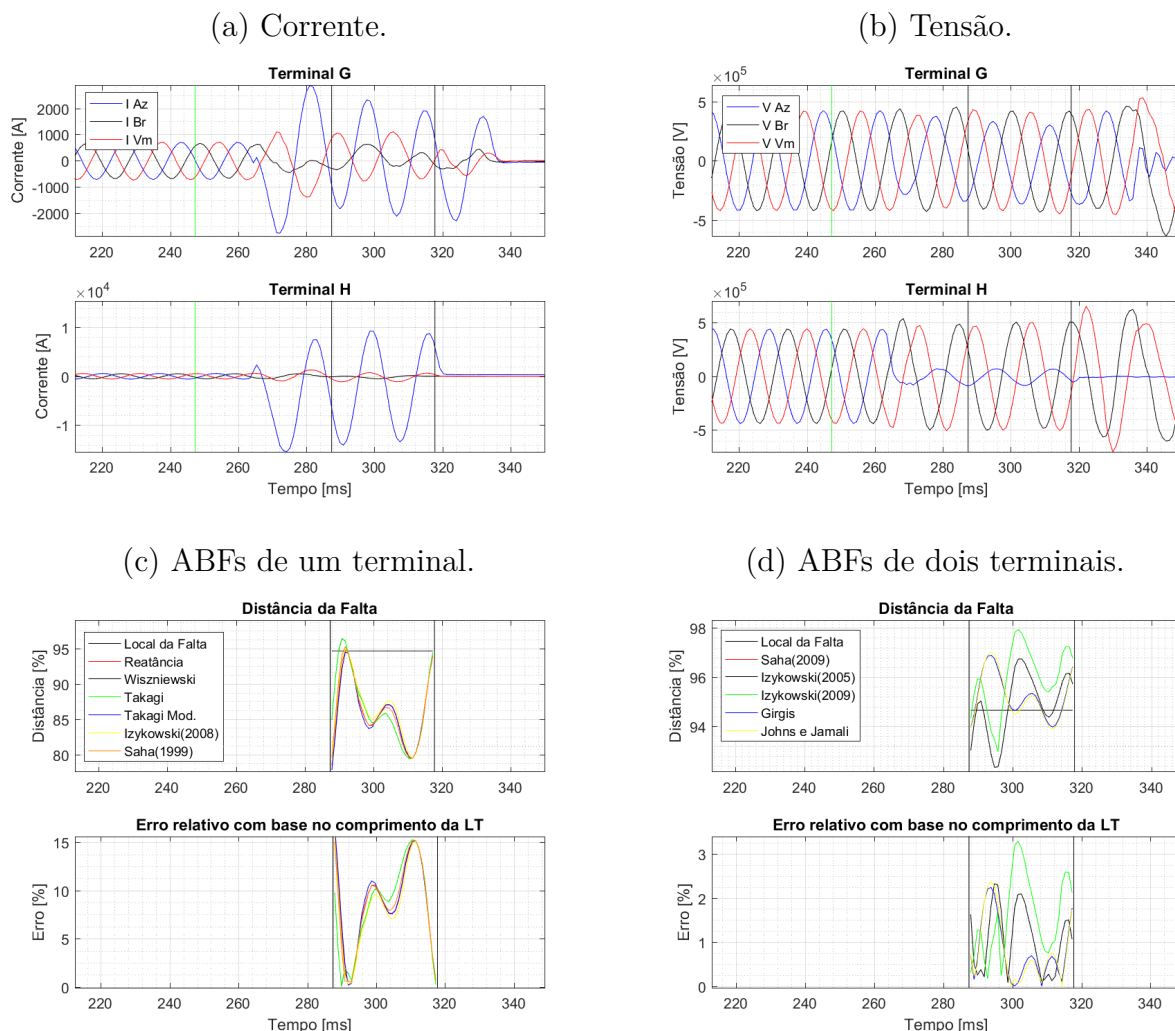
Fonte: Autor.

5.12 Estudo de Caso 11 – Falta monofásica a 95% de uma LT longa com compensação *shunt* e série

Houve o desligamento automático da LT 500 kV Serra da Mesa 2/Luziânia provocado por uma falta monofásica fase azul causada por excremento de pássaro. O local da falta foi a 297,9 km da SE Serra da Mesa 2, que corresponde a 94,65 % da LT. A resistência de falta calculada foi $0,3\Omega$, corrente de carga de 500 A e ângulo de carga de -7° .

Os algoritmos de um terminal, Figura 47c, tiveram erros entre 8,11 % e 9,48 %. Os algoritmos de dois terminais, Figura 47d, tiveram erros de 0,25 % a 1,26 %.

Figura 47 – Estudo de Caso 11 – Falta monofásica fase azul na LT 500 kV Serra da Mesa 2/Luziânia, provocada por excremento de pássaro, a 94,65 % da da SE Serra da Mesa 2, $\theta = -7^\circ$, $R_F = 0,3\Omega$.



Fonte: Autor.

5.13 Considerações Finais

A Tabela 5 apresenta o resumo dos resultados da aplicação dos algoritmos de localização de faltas com base em fasores em faltas reais. Os ABFs de um terminal foram aplicados a partir do terminal da SE Local e, em geral, tiveram erros inferiores a 5 %, exceto no Caso 1, Caso 9, Caso 10 e Caso 11. Os dois últimos casos citados foram próximos ao terminal remoto e, portanto, o perda de desempenho era esperada.

Os algoritmos de dois terminais, em geral, tiveram bons desempenhos, com erros inferiores a 2,5 %, exceto no Caso 1 e Caso 10, com erros de até 6,08 % e 2,75 %, respectivamente. Os algoritmos Saha *et al.* (2009) e Izykowski *et al.* (2005) tiveram desempenhos semelhantes. Em geral, os algoritmos de dois terminais apresentaram desempenho superior aos algoritmos de um terminal, exceto no Caso 2 e no Caso 8.

Tabela 5 – Resumo dos resultados da aplicação dos ABFs em faltas reais.

| Faltas Reais | Local da Falta | ABFs de um terminal | | | | | | ABFs de dois terminais | | | | |
|-----------------------|----------------|---|--------------------|-----------------------------|-------------------|------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| | | Reatância | Wiszniewski (1983) | Takagi <i>et al.</i> (1982) | Takagi Modificado | Izykowski (2008) | Saha <i>et al.</i> (1999) | Saha <i>et al.</i> (2009) | Izykowski <i>et al.</i> (2005) | Izykowski <i>et al.</i> (2011) | Girgis <i>et al.</i> (1992) | Johns e Jamali (1990) |
| | | Erro relativo com base no comprimento da LT [%] | | | | | | | | | | |
| Caso 1 ¹ | 32.84 | 10.17 | 10.72 | 10.71 | 10.52 | 10.49 | 10.61 | 1.78 | 1.78 | 2.00 | 5.65 | 6.08 |
| Caso 2 ² | 79.10 | 0.67 | 0.63 | 0.64 | 0.63 | 0.69 | 0.63 | 1.36 | 1.36 | 1.64 | 0.39 | 1.87 |
| Caso 3 ³ | 1.99 | 1.56 | 1.55 | 1.54 | 1.55 | 1.60 | 1.55 | 0.92 | 0.92 | 0.45 | 0.38 | 0.29 |
| Caso 4 ⁴ | 77.87 | 4.33 | 4.21 | 4.20 | 4.21 | 4.39 | 4.21 | 2.04 | 2.04 | 2.29 | 1.54 | 1.75 |
| Caso 5 ⁵ | 18.84 | 1.35 | 1.47 | 1.47 | 1.57 | 1.65 | 1.54 | 1.11 | 1.11 | 0.45 | 1.08 | 1.31 |
| Caso 6 ⁶ | 18.84 | 0.98 | 0.98 | 0.98 | 0.98 | 1.08 | 0.98 | | | | | |
| Caso 7 ⁷ | 86.96 | 2.21 | 2.24 | 2.19 | 2.24 | 3.23 | 2.25 | 0.23 | 0.23 | 0.91 | 0.60 | 1.82 |
| Caso 8 ⁸ | 1.00 | 0.95 | 0.96 | 0.96 | 0.96 | 0.96 | 0.96 | 0.39 | 0.39 | 2.19 | 1.00 | 0.94 |
| Caso 9 ⁹ | 42.96 | 7.24 | 7.29 | 7.29 | 7.29 | 7.31 | 7.29 | 1.59 | 1.59 | 1.90 | 0.34 | 2.39 |
| Caso 10 ¹⁰ | 72.94 | 7.61 | 8.07 | 8.07 | 7.78 | 7.19 | 7.78 | 2.00 | 2.00 | 2.74 | 2.75 | 2.35 |
| Caso 11 ¹¹ | 94.65 | 9.02 | 9.47 | 9.48 | 9.12 | 8.11 | 9.41 | 0.25 | 0.25 | 1.26 | 0.42 | 0.33 |

Fonte: Autor.

¹ Estudo de Caso 1 – Falta monofásica a 33% de uma LT curta
² Estudo de Caso 2 – Falta bifásica a 79% de uma LT curta
³ Estudo de Caso 3 – Falta bifásica a 2% de uma LT média
⁴ Estudo de Caso 4 – Falta bifásica a 78% de uma LT média
⁵ Estudo de Caso 5 – Falta monofásica a 19% de uma LT longa com compensação *shunt*.
⁶ Estudo de Caso 6 – Religamento sob Falta trifásica a 19% de uma LT longa com compensação *shunt*
⁷ Estudo de Caso 7 – Falta bifásica terra a 87% de uma LT longa com compensação *shunt*
⁸ Estudo de Caso 8 – Falta monofásica a 0% de uma LT longa com compensação *shunt* e série
⁹ Estudo de Caso 9 – Falta bifásica a 43% de uma LT longa com compensação *shunt* e série
¹⁰ Estudo de Caso 10 – Falta monofásica a 73% de uma LT longa com compensação *shunt* e série
¹¹ Estudo de Caso 11 – Falta monofásica a 95% de uma LT longa com compensação *shunt* e série

6 Conclusão

Essa dissertação apresenta o desafio de encontrar a abordagem de Localização de Faltas com Base em Fasores mais adequada para um sistema monitorado. A proposta é selecionar essa abordagem com base nos requisitos dos algoritmos apresentados e das fontes de erros presentes nesse sistema. Foram apresentados diversos algoritmos com formulações distintas e os seus desempenhos foram analisados em casos de faltas reais e faltas simuladas no ATPDRAWTM. As análises foram realizadas no *software* implementado em ambiente MATLAB[®] customizado para viabilização desses estudo.

Foram elaborados quadros apresentando o resumo dos efeitos das fontes de erros e os requisitos de dados e parâmetros para subsidiar essa escolha. A disponibilidade dos requisitos de dados e parâmetros, apresentados no [Quadro 6](#), é um fator crítico a ser considerado na escolha do ABF mais adequado. Para selecionar uma abordagem robusta e confiável, capaz de aprimorar a precisão da estimativa de localização, é primordial conhecer o sistema monitorado e considerar as possíveis fontes de erro, resumidas no [Quadro 8](#).

O Algoritmo da [Reatância](#) é inadequado para estimar a localização de faltas, devido à sua sensibilidade ao “efeito reatância”. Para solucionar esse problema, os algoritmos [Takagi et al. \(1982\)](#), [Wiszniewski \(1983\)](#), [Takagi Modificado](#), [Izykowski \(2008\)](#) e [Saha et al. \(1999\)](#) apresentam recursos para reduzir o impacto da corrente de carga e os quatro últimos consideram a não homogeneidade do sistema, eliminando o impacto do “efeito reatância”. Entretanto, as variações da resistividade do solo afetam o desempenho desses algoritmos em casos de faltas à terra. Os ABFs de dois terminais eliminam as fontes de erros relacionadas à resistência de falta e à resistividade do solo, além de apresentarem recursos para corrigir possíveis falhas de sincronismo. O ABF [Izykowski et al. \(2011\)](#), que utiliza o modelo de linha longa, é mais preciso que os ABFs [Saha et al. \(2009\)](#) e [Izykowski et al. \(2005\)](#), mas apresenta menor robustez aos erros de sincronismo.

Outras fontes de erros afetam os ABFs de formas distintas. LTs não transpostas, ou com trechos longos sem transposição, impactam nos resultados dos ABFs que consideram a LT perfeitamente transposta. Para esses casos, a abordagem matricial proposta por [Saha et al. \(1999\)](#), [Girgis et al. \(1992\)](#) e [Johns e Jamali \(1990\)](#) são mais apropriadas. Nos casos de LTs com trechos longos sem transposição, recomenda-se a utilização do algoritmo [Girgis et al. \(1992\)](#) com a formulação utilizada nesse trabalho.

A componente DC de decaimento exponencial e a presença de BCSs provocam distorções no processo de cálculo dos fasores de tensão e corrente. A utilização da mediana dos resultados, encontrados no período estacionário de falta, reduz o impacto dessas fontes de erros. Outra solução é a utilização de algoritmos para cálculo dos fasores com recursos

para reduzir essas distorções.

Em geral, os ABFs de dois terminais apresentaram maior robustez e melhor desempenho com erros inferiores a 2%. Entretanto, em alguns casos específicos, o erro pode ser maior ultrapassando 4%. Essa margem de erro compromete o desempenho das equipes de manutenção. Portanto, para LTs longas e para LTs com BCS, é recomendável a utilização de um conjunto de algoritmos de localização de faltas para delimitar uma região de busca.

Como propostas de trabalhos futuros, deixa-se as seguintes sugestões:

- Avaliar o desempenho dos algoritmos abordados nesse trabalho em relação às fontes de erros não consideradas anteriormente, tais como: saturação de TC; LTs de três terminais; LTs não homogêneas; dutos paralelos às LTs; acoplamento mútuo em LTs paralelas e outros;
- Expandir a análise de ABFs aplicáveis aos casos de Linhas de Transmissão com trechos longos sem transposição;
- Incluir algoritmos aplicáveis aos casos em que os BCSs estejam instalados na região entre os TPs;
- Realizar estudos considerando outros Algoritmos de Estimação de Fasores com recursos para reduzir as distorções causadas pela componente DC de decaimento exponencial e a presença de BCSs.
- Realizar estudos considerando a atuação das proteções dos BCSs com disparo do *Spark Gap* e do disjuntor de *bypass*;
- Realizar o estudo do efeito da variação da resistividade do solo em trechos específicos da LT;
- Comparar o desempenho dos ABFs apresentados com os ABFs sem parâmetros (*Parameter-Free Fault Location Algorithm*);
- Realizar estudos de caso utilizando dados gerados por *Phasor Measurement Unit* – PMUs.

Referências

- ALTUVE, H. J.; MOONEY, J. B.; ALEXANDER, G. E. Advances in series-compensated line protection. In: *2009 62nd Annual Conference for Protective Relay Engineers*. College Station, TX, USA: IEEE, 2009. p. 263–275. ISBN 978-1-4244-4182-2. Citado 2 vezes nas páginas 73 e 74.
- AMBERG, A.; RANGEL, A.; SMELICH, G. Validating transmission line impedances using known event data. In: *2012 65th Annual Conference for Protective Relay Engineers*. College Station, TX, USA: IEEE, 2012. p. 269–280. ISBN 978-1-4673-1842-6 978-1-4673-1840-2 978-1-4673-1841-9. Citado na página 65.
- ANEEL. *Resolução Normativa nº 905, de 8 de dezembro de 2020. Regras dos Serviços de Transmissão de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional. Módulo 4 - Prestação dos Serviços*. [S.l.]: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2020. Citado na página 24.
- ATPDRAW. *ATPDRAW version 5.6 - Users' Manual*. 2009. Citado 2 vezes nas páginas 114 e 115.
- BAINS, T. P. S.; ZADEH, M. R. D. Supplementary Impedance-Based Fault-Location Algorithm for Series-Compensated Lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 31, n. 1, p. 334–342, fev. 2016. ISSN 0885-8977, 1937-4208. Citado 2 vezes nas páginas 73 e 76.
- CEPEL ANAFAS. *ANAFAS – Análise de Falhas – Manual do Usuário*. [S.l.]: Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, 2017. Versão 7.1.0. Citado 2 vezes nas páginas 52 e 105.
- DAS, S. *et al.* Impedance-based fault location in transmission networks: theory and application. *IEEE Access*, v. 2, p. 537–557, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 28, 60, 61 e 70.
- ETEE. *Projeto Básico LT 500kV Samambaia – Itumbiara e LT 500kV Samambaia – Emborcação, Expansion Transmissão de Energia Elétrica – ETEE*. 2001. Citado 3 vezes nas páginas 81, 116 e 117.
- GIRGIS, A.; HART, D.; PETERSON, W. A new fault location technique for two- and three-terminal lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 7, n. 1, p. 98–107, 1992. Citado 12 vezes nas páginas 21, 40, 43, 47, 48, 61, 62, 79, 84, 85, 98 e 99.
- GUIMARÃES, J. *Investigação de Esquemas de Proteção para Linhas de Transmissão em EAT com Circuitos Duplos e com Compensação Série-Fixa*. [S.l.]: Dissertação de Mestrado Universidade Federal de Itajubá, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 111, 123 e 124.
- David G Hart, Damir Novosel; e Robert A Smith. *Modified Cosine Filters*. 2000. 6,154,687. Citado na página 70.
- IBRAHIM, M. A. *Disturbance analysis for power systems*. Hoboken, N.J: Wiley : IEEE Press, 2012. ISBN 978-0-470-91681-0 978-1-118-17211-7 978-1-118-17209-4 978-1-118-17210-0. Citado na página 70.

IEEE Std 81TM-2012. *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System*. [S.l.], 2012. ISBN: 9780738180281. Citado 2 vezes nas páginas 65 e 66.

IEEE Std C37.111-1999. *C37.111-1999 - IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems*. [S.l.], 1999. ISBN: 9780738116679. Citado na página 86.

IEEE Std C37.114TM-2014. *IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines. IEEE Std C37.114-2014 (Revision of IEEE Std C37.114-2004)*, p. 1–76, 2015. Citado 6 vezes nas páginas 29, 30, 32, 33, 34 e 56.

IZYKOWSKI, J. *Fault location on power transmission lines*. [S.l.: s.n.], 2008. Citado 16 vezes nas páginas 11, 13, 21, 28, 34, 37, 38, 47, 48, 85, 98, 99, 105, 108, 109 e 110.

IZYKOWSKI, J. *et al.* Accurate Noniterative Fault-Location Algorithm Utilizing Two-End Unsynchronized Measurements. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 26, n. 2, p. 547–555, 2011. Citado 10 vezes nas páginas 21, 40, 42, 47, 48, 79, 84, 85, 98 e 99.

IZYKOWSKI, J.; ROSOLOWSKI, E.; SAHA, M. Post-fault analysis of operation of distance protective relays of power transmission lines. In: *2005 IEEE Russia Power Tech*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 1–7. Citado 10 vezes nas páginas 21, 40, 41, 47, 48, 79, 84, 85, 98 e 99.

JOHNS, A. T.; JAMALI, S. Accurate fault location technique for power transmission lines. *IEE Proceedings C Generation, Transmission and Distribution*, v. 137, n. 6, p. 395, 1990. Publisher: Institution of Engineering and Technology (IET). Citado 13 vezes nas páginas 21, 40, 45, 46, 47, 48, 61, 62, 79, 84, 85, 98 e 99.

KERSTING, W. H. *Distribution system modeling and analysis*. Boca Raton: CRC Press, 2002. (The electric power engineering series). ISBN 978-0-8493-0812-3. Citado 2 vezes nas páginas 60 e 61.

LOPES, F. V. *et al.* Phasor-based fault location challenges and solutions for transmission lines equipped with high-speed time-domain protective relays. *Electric Power Systems Research*, v. 189, p. 106617, dez. 2020. ISSN 03787796. Citado na página 57.

NBR7117:2012. *NBR7117:2012 – Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo*. 2012. Citado na página 65.

Nokian Capacitors. *Series Capacitors Bank - Serra da Mesa II & Luziânia 253 Mvar - Instruction Manual*. 2007. Citado 2 vezes nas páginas 74 e 112.

OLIVEIRA, N. L. S.; SOUZA, B. A. D. Effects of the exponentially decaying DC offset in the phasor estimation algorithms performance. In: *2012 Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA)*. Montevideo: IEEE, 2012. p. 1–5. ISBN 978-1-4673-2673-5 978-1-4673-2672-8 978-1-4673-2671-1. Citado na página 70.

ONS. *Base de Dados do ONS para o ANAFAS*. 2018. Citado 6 vezes nas páginas 53, 54, 111, 113, 127 e 130.

ONS. *Mapa Geométrico – Rede de Operacao – Brasil – Horizonte 2023*. [S.l.]: Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 53 e 106.

- ONS. *Procedimentos de Rede – Submódulo 6.7 – Apuração de indisponibilidade, restrição da capacidade operativa e sobrecarga nas instalações de transmissão da Rede Básica e das Interligações Internacionais*. [S.l.]: Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- ONS. *Evolução da capacidade instalada do SIN – maio 2023/ dezembro 2027*. [S.l.]: Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2023. Citado na página 24.
- PTE. *Projeto Básico LT 500kV Luziânia – Pirapora 2, Paranaíba Transmissora de Energia – PTE*. 2016. Citado na página 122.
- PTE. *Projeto Básico LT 500kV Rio das Éguas – Luziânia, Paranaíba Transmissora de Energia – PTE*. 2017. Citado 3 vezes nas páginas 112, 120 e 121.
- SAHA, M. *et al.* A new accurate fault locating algorithm for series compensated lines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 14, n. 3, p. 789–797, 1999. Citado 15 vezes nas páginas 11, 13, 21, 28, 37, 47, 48, 62, 84, 85, 98, 99, 105, 108 e 109.
- SAHA, M. *et al.* Fault location in uncompensated and series-compensated parallel lines. In: *2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37077)*. [S.l.: s.n.], 2000. v. 4, p. 2431–2436 vol.4. Citado na página 37.
- SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOLOWSKI, E. *Fault location on power networks*. 2010. ed. London, England: Springer, 2009. (Power systems). Citado 20 vezes nas páginas 21, 24, 28, 31, 32, 33, 34, 36, 37, 40, 47, 48, 59, 61, 68, 79, 84, 85, 98 e 99.
- SCHWEITZER, E. O. Evaluation and development of transmission line fault-locating techniques which use sinusoidal steady-state information. *Computers & Electrical Engineering*, v. 10, n. 4, p. 269–278, 1983. ISSN 0045-7906. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 34.
- SMTE. *Projeto Básico LT 500kV Serra da Mesa 2 – Luziânia – Paracatu 4 – Emborcação e LT 500 kV Luziânia – Samambaia, Serra da Mesa Transmissora de Energia – SMTE*. 2007. Citado 5 vezes nas páginas 51, 62, 118, 119 e 125.
- SPTE. *Projeto Básico LT 500kV Paracatu 4 – Pirapora 2, Serra Paracatu Transmissora de Energia – SPTE*. 2009. Citado na página 119.
- TAKAGI, T. *et al.* Development of a New Type Fault Locator Using the One-Terminal Voltage and Current Data. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101, n. 8, p. 2892–2898, 1982. Citado 11 vezes nas páginas 21, 28, 33, 34, 37, 47, 48, 68, 85, 98 e 99.
- WISZNIEWSKI, A. Accurate fault impedance locating algorithm. *IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution*, v. 130, p. 311–314, 1983. Citado 15 vezes nas páginas 11, 13, 21, 28, 33, 37, 47, 48, 85, 98, 99, 105, 108, 109 e 110.
- ZIEGLER, G. *Numerical distance protection: principles and applications*. 4th, updated and enl. ed. ed. Erlangen: Publicis Publ, 2011. ISBN 978-3-89578-381-4. Citado 3 vezes nas páginas 30, 74 e 75.
- ZIMMERMAN, K.; COSTELLO, D. Impedance-Based Fault Location Experience. In: *2006 IEEE Rural Electric Power Conference*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1–16. Citado na página 34.

Apêndices

APÊNDICE A – Modelamento do Sistema Elétrico

O sistema elétrico da [Figura 48](#) compõe a interligação norte-sul do SIN. O sistema será modelado a partir da ferramenta de cálculo de equivalentes do ANAFAS[®]. O resultado obtido será utilizado para representar a área externa aos equipamentos inseridos no ATPDRAW[™]. O sistema equivalente não contém explicitamente a área externa, porém o seu efeito nas grandezas calculadas na área interna é considerado através das ligações equivalentes série e *shunt* que surgem na construção do sistema equivalente ([CEPEL ANAFAS, 2017](#)).

O cálculo dos equivalentes de *Thévenin* no ANAFAS[®] foi realizado com o método de seleção da região preservada por conjuntos de barras. As barras do sistema interno, que estão conectadas ao sistema externo, são chamadas de barras de fronteira. Foram selecionadas as barras do setor de 500 kV das subestações: Gurupí, Serra da Mesa, Serra da Mesa 2, Rio das Éguas, Samambaia, Luziânia, Itumbiara, Emborcação, Paracatu 4 e Pirapora 2, conforme apresentado na [Figura 49](#). O cálculo de equivalentes utilizado preserva todos os circuitos *shunt* originais ligados às barras de fronteira, todos os circuitos série ligados entre essas barras, adiciona as ligações equivalentes entre as barras ([Tabela 6](#)) e insere as impedâncias e fontes de *Thévenin* entre as barras de fronteira e a referência ([Tabela 7](#)). No caso estudado, serão desprezadas ligações equivalentes maiores que 0,5 pu (1250 Ω). Todas as grandezas em pu estão na base 500 kV e 100 MV A.

Tabela 6 – Ligações equivalentes entre as barras calculadas pelo ANAFAS[®].

| Nome | R_0 [% pu] | X_0 [% pu] | R_1 [% pu] | X'_d % pu] | R_0 [Ω] | X_0 [Ω] | R_1 [Ω] | X'_d [Ω] |
|---------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------|-----------|-----------|------------|
| EQUIV. Emborcação/Pirapora 2 | ∞ | ∞ | 3,449 | 34,750 | ∞ | ∞ | 86,230 | 868,900 |
| EQUIV. Serra da Mesa/Samambaia | ∞ | ∞ | 3,266 | 37,320 | ∞ | ∞ | 81,660 | 933,000 |
| EQUIV. Itumbiara/Samambaia | ∞ | ∞ | 0,407 | 5,742 | ∞ | ∞ | 10,180 | 143,600 |
| EQUIV. Emborcação/Itumbiara | 11,240 | 30,730 | 0,303 | 3,869 | 280,9 | 768,1 | 7,566 | 96,730 |

Fonte: Autor.

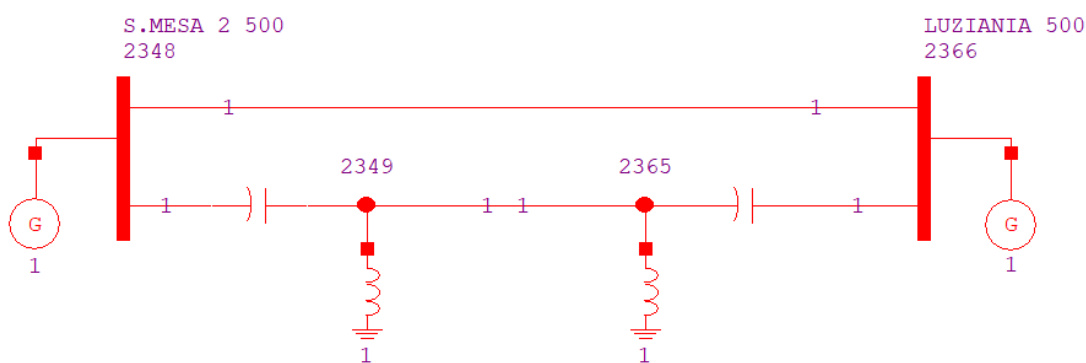
Os algoritmos [Wiszniewski \(1983\)](#), [Takagi Modificado](#), [Izykowski \(2008\)](#) e [Saha et al. \(1999\)](#) utilizam os parâmetros do sistema elétrico para compensar possíveis erros causados pela contribuição do terminal remoto. Os parâmetros utilizados são as impedâncias dos equivalentes de *Thévenin* dos terminais G e H e a impedância equivalente de *Thévenin* da ligação entre as barras G e H. Esses parâmetros foram obtidos pelo ANAFAS[®] pelo método de seleção da região preservada por conjunto de barras. As barras de fronteira selecionadas foram as barras do terminal G e do terminal H, conforme apresentado na [Figura 51](#). Os

Tabela 7 – Equivalentes de *Thévenin* entre as barras de fronteira e a referência calculados pelo ANAFAS®.

| Subestação | R_0 [% pu] | X_0 [% pu] | R_1 [% pu] | X''_d [% pu] | R_0 [Ω] | X_0 [Ω] | R_1 [Ω] | X''_d [Ω] |
|---------------|--------------|--------------|--------------|----------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Gurupi | 1,216 | 5,359 | 0,144 | 1,066 | 30,400 | 133,980 | 3,590 | 26,660 |
| Peixe 2 | 0,338 | 4,412 | 0,014 | 9,777 | 8,450 | 110,310 | 0,350 | 244,420 |
| Rio das Éguas | 1,502 | 7,998 | 0,518 | 5,335 | 37,560 | 199,950 | 12,960 | 133,390 |
| Serra da Mesa | 0,011 | 0,827 | 0,031 | 2,247 | 0,270 | 20,680 | 0,790 | 56,170 |
| Samambaia | 0,073 | 1,390 | 0,328 | 4,519 | 1,830 | 34,760 | 8,200 | 112,970 |
| Luziânia | 0,064 | 2,733 | 60,241 | 171,490 | 1,610 | 68,330 | 1506,03 | 4287,25 |
| Emborcação | 0,211 | 1,731 | 0,089 | 0,665 | 5,270 | 43,280 | 2,230 | 16,630 |
| Itumbiara | 0,019 | 0,446 | 0,022 | 0,559 | 0,470 | 11,140 | 0,540 | 13,970 |
| SE Paracatu 4 | 0,438 | 7,651 | 5,288 | 23,934 | 10,950 | 191,270 | 132,190 | 598,350 |
| SE Pirapora 2 | 0,074 | 2,024 | 0,411 | 5,597 | 1,840 | 50,610 | 10,280 | 139,930 |

Fonte: Autor.

Figura 51 – Equivalentes de *Thévenin* do sistema elétrico, para aplicação dos algoritmos: Wiszniewski (1983), Takagi Modificado, Izykowski (2008) e Saha *et al.* (1999).



Fonte: Autor.

Tabela 8 – Equivalentes de *Thévenin* do terminal G, para aplicação dos algoritmos: [Wiszniewski \(1983\)](#), [Takagi Modificado](#), [Izykowski \(2008\)](#) e [Saha et al. \(1999\)](#).

| Linha de Transmissão | Terminal G | R_{0G} [% pu] | X_{0G} [% pu] | R_{1G} [% pu] | X_{1G} [% pu] |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| LT Rio das Éguas/Luziânia | Rio das Éguas | 0,76 | 4,39 | 0,18 | 2,52 |
| LT Barreiras/Rio das Éguas | Barreiras | 0,31 | 6,5 | 4,59 | 25,18 |
| LT Serra da Mesa 2/Luziânia | Serra da Mesa 2 | 0,39 | 2,08 | 0,09 | 0,91 |
| LT Samambaia/Luziânia | Samambaia | 0,11 | 0,94 | 0,06 | 0,74 |
| LT Samambaia/Emborcação | Samambaia | 0,11 | 0,84 | 0,06 | 0,68 |
| LT Samambaia/Itumbiara | Samambaia | 0,11 | 0,85 | 0,06 | 0,69 |
| LT Luziânia/Paracatu 4 | Luziânia | 0,15 | 1,29 | 0,08 | 0,80 |
| LT Luziânia/Pirapora 2 | Luziânia | 0,15 | 1,28 | 0,07 | 0,72 |
| LT Paracatu 4/Emborcação | Paracatu 4 | 0,41 | 2,94 | 0,16 | 1,75 |
| LT Paracatu 4/Pirapora 2 | Paracatu 4 | 0,39 | 2,83 | 0,09 | 1,19 |

Fonte: Autor.

Tabela 9 – Equivalentes de *Thévenin* do terminal H, para aplicação dos algoritmos: [Wiszniewski \(1983\)](#), [Takagi Modificado](#), [Izykowski \(2008\)](#) e [Saha et al. \(1999\)](#).

| Linha de Transmissão | Terminal H | R_{0H} [% pu] | X_{0H} [% pu] | R_{1H} [% pu] | X_{1H} [% pu] |
|-----------------------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| LT Rio das Éguas/Luziânia | Luziânia | 0,14 | 1,23 | 0,07 | 0,79 |
| LT Barreiras/Rio das Éguas | Rio das Éguas | 0,96 | 4,50 | 0,11 | 1,03 |
| LT Serra da Mesa 2/Luziânia | Luziânia | 0,14 | 1,24 | 0,08 | 1,06 |
| LT Samambaia/Luziânia | Luziânia | 0,15 | 1,49 | 0,13 | 1,26 |
| LT Samambaia/Emborcação | Emborcação | 0,04 | 0,58 | 0,03 | 0,60 |
| LT Samambaia/Itumbiara | Itumbiara | 0,02 | 0,41 | 0,02 | 0,46 |
| LT Luziânia/Paracatu 4 | Paracatu 4 | 0,43 | 3,37 | 0,17 | 2,11 |
| LT Luziânia/Pirapora 2 | Pirapora 2 | 0,09 | 1,85 | 0,28 | 3,58 |
| LT Paracatu 4/Emborcação | Emborcação | 0,04 | 0,58 | 0,03 | 0,56 |
| LT Paracatu 4/Pirapora 2 | Pirapora 2 | 0,10 | 1,74 | 0,22 | 2,9 |

Fonte: Autor.

Tabela 10 – Equivalente de *Thévenin* da ligação entre as barras G e H, para aplicação dos algoritmos: [Wiszniewski \(1983\)](#), [Takagi Modificado](#) e [Izykowski \(2008\)](#).

| Linha de Transmissão | R_{0P} [% pu] | X_{0P} [% pu] | R_{1P} [% pu] | X_{1P} [% pu] |
|-------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| LT Rio das Éguas/Luziânia | 33,40 | 96,93 | 0,430 | 4,970 |
| LT Barreiras/ Rio das Éguas | 934,0 | 2101 | 14,81 | 89,64 |
| LT Serra da Mesa 2/ Luziânia | 15,73 | 34,59 | 0,150 | 1,450 |
| LT Samambaia/ Luziânia | 30,64 | 69,66 | 0,310 | 2,140 |
| LT Samambaia/Emborcação | 48,04 | 90,93 | 0,210 | 3,050 |
| LT Samambaia/Itumbiara | 45,33 | 90,24 | 0,230 | 3,050 |
| LT Luziânia/Paracatu 4 | 59,29 | 112,99 | 0,480 | 6,570 |
| LT Luziânia/Pirapora 2 | 13,08 | 40,44 | 0,410 | 5,730 |
| LT Paracatu 4/ Emborcação | 146,31 | 346,78 | 0,800 | 9,180 |
| LT Paracatu 4/ Pirapora 2 | 37,42 | 87,00 | 0,500 | 8,600 |

Fonte: Autor.

A.1 Bancos de Capacitores Série – BCSs – e Reatores

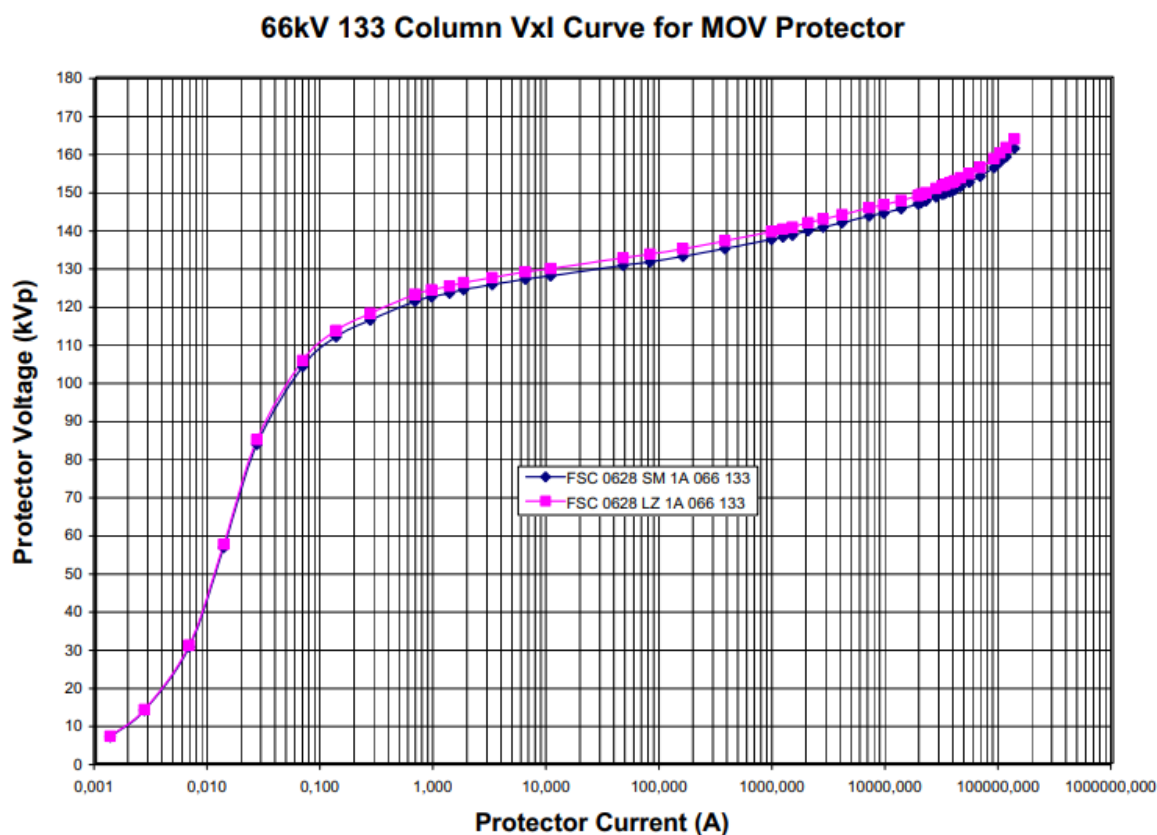
As informações para a implementação dos modelos dos BCSs foram retiradas do banco de dados da EPE, do ONS e de [Guimarães \(2016\)](#). Os BCSs instalados nas linhas da SE Gurupi para SE Serra da Mesa são tiristorizados na SE Serra da Mesa, porém estão sendo considerados fixos nessa simulação ([GUIMARÃES, 2016](#)). Foram consideradas as informações da base de dados do [ONS \(2018\)](#) para os equipamentos não encontrados em [Guimarães \(2016\)](#). Os dados dos MOVs estão apresentados na [Tabela 11](#), na [Figura 52](#) e na [Figura 53](#). Os MOVs com dados faltantes foram ajustados com base no MOV da [Figura 52](#), considerando os valores da corrente de proteção e da admitância dos BCSs. Os dados de compensação *shunt* foram retirados do banco de dados do [ONS \(2018\)](#) e apresentados na [Tabela 12](#).

Tabela 11 – Dados dos Bancos de Capacitores Série .

| Terminal | Linha de Transmissão | EPE | | | ONS 2019 | |
|-----------------|------------------------------|-----------|------------------------------------|-------------------------------|--|-----------|
| | | $[\mu S]$ | Corrente de Proteção [RMS/fase] | Corrente Máxima [RMS/fase] | Energia Máxima [MJ/fase] $[\mu S]$ | |
| Gurupi | LT1 Gurupi/Serra da Mesa | 42 102,37 | 3908,29 | 8600,00 | 24,10 | 42 105,26 |
| Gurupi | LT2 Gurupi/Serra da Mesa | 42 102,37 | 3908,29 | 8600,00 | 24,10 | 42 105,26 |
| Gurupi | LT Gurupi/Peixe 2 | 74 625,39 | 4121,27 | 21 000,00 | 47,60 | 74 626,87 |
| Peixe 2 | LT Peixe 2/Serra da Mesa 2 | 28 327,11 | 4018,29 | 10 500,00 | 46,70 | 28 328,61 |
| Rio das Éguas | LT Rio das Éguas/Luziânia | | | | | 46 728,97 |
| Serra da Mesa 2 | LT Serra da Mesa 2/ Luziânia | 40 281,50 | 4249,76 | 31 000,00 | | 40 567,95 |
| Serra da Mesa | LT1 Gurupi/Serra da Mesa | 62 791,64 | 3623,23 | 11 100,00 | 12,00 | 63 492,06 |
| Serra da Mesa | LT2 Gurupi/Serra da Mesa | 62 791,64 | 3623,23 | 11 100,00 | 12,00 | 63 492,06 |
| Samambaia | LT1 Serra da Mesa/ Samam. | | | | | 21 857,92 |
| Samambaia | LT2 Serra da Mesa/ Samam. | 32 048,01 | | | | 32 000,00 |
| Samambaia | LT3 Serra da Mesa/ Samam. | 32 048,01 | | | | 32 000,00 |
| Luziânia | LT Rio das Éguas/Luziânia | | | | | 46 728,97 |

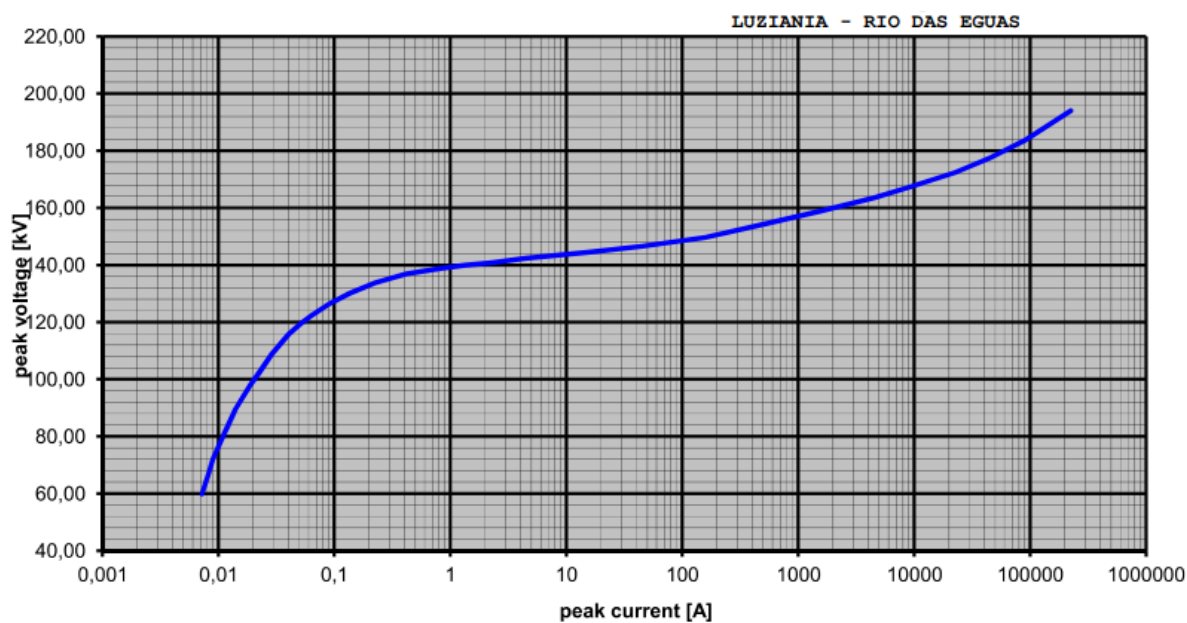
Fonte: [ONS \(2018\)](#), [Guimarães \(2016\)](#).

Figura 52 – Curva característica de tensão e de corrente dos MOVs da LT 500 kV Serra da Mesa 2/Luziânia.



Fonte: [Nokian Capacitors \(2007\)](#).

Figura 53 – Curva característica de tensão e de corrente dos MOVs da LT 500 kV Rio das Éguas/Luziânia.



Fonte: [PTE \(2017\)](#).

Tabela 12 – Dados dos Reatores.

| Subestação | Ponto de Conexão | Equipamento | X_d'' % pu | X_d'' |
|-----------------|------------------------------|-------------|--------------|---------|
| Barreiras 2 | LT Barreiras/ Rio das Éguas | Reator LT | 57,47 | 1436,78 |
| Barreiras 2 | LT Barreiras/ Rio das Éguas | Reator LTN | 32,00 | 800,00 |
| Emborcação | LT Samambaia/Emborcação | Reator LT | 136,05 | 3401,36 |
| Emborcação | Barra | Reator | 55,00 | 1375,00 |
| Emborcação | LT Samambaia/Emborcação | Reator LTN | 32,00 | 800,00 |
| Gurupi | LT1 Gurupi/Serra da Mesa | Reator LT1 | 169,53 | 4238,25 |
| Gurupi | LT2 Gurupi/Serra da Mesa | Reator LT2 | 169,53 | 4238,25 |
| Itumbiara | LT Samambaia/Itumbiara | Reator LT | 73,53 | 1838,37 |
| Luziânia | LT Serra da Mesa 2/ Luziânia | Reator LT | 73,58 | 1839,59 |
| Luziânia | LT Serra da Mesa 2/ Luziânia | Reator LTN | 32,00 | 800,00 |
| Luziânia | LT Rio das Éguas/Luziânia | Reator LT | 37,04 | 925,93 |
| Luziânia | LT Rio das Éguas/Luziânia | Reator LTN | 24,00 | 600,00 |
| Luziânia | LT Luziânia/Pirapora 2 | Reator LT | 50,00 | 1249,94 |
| Luziânia | LT Luziânia/Pirapora 2 | Reator LTN | 32,00 | 800,00 |
| Luziânia | Barra | Reator 1 | 73,53 | 1838,25 |
| Luziânia | Barra | Reator 2 | 73,53 | 1838,25 |
| Pirapora 2 | LT Luziânia/Pirapora 2 | Reator LT | 50,00 | 1249,94 |
| Pirapora 2 | LT Luziânia/Pirapora 2 | Reator LTN | 32,00 | 800,00 |
| Rio das Éguas | LT Rio das Éguas/Luziânia | Reator LT | 37,04 | 925,93 |
| Rio das Éguas | LT Rio das Éguas/Luziânia | Reator LTN | 24,00 | 600,00 |
| Rio das Éguas | LT Barreiras/ Rio das Éguas | Reator LT | 57,47 | 1436,78 |
| Rio das Éguas | LT Barreiras/ Rio das Éguas | Reator LTN | 32,00 | 800,00 |
| Samambaia | LT1 Serra da Mesa/ Samambaia | Reator LT1 | 137,00 | 3425,00 |
| Samambaia | LT2 Serra da Mesa/ Samambaia | Reator LT2 | 73,53 | 1838,25 |
| Samambaia | LT3 Serra da Mesa/ Samambaia | Reator LT3 | 73,53 | 1838,25 |
| Samambaia | LT Samambaia/Emborcação | Reator LT | 136,05 | 3401,36 |
| Samambaia | LT Samambaia/Emborcação | Reator LTN | 32,00 | 800,00 |
| Samambaia | LT Samambaia/Itumbiara | Reator LT | 136,05 | 3401,36 |
| Samambaia | LT Samambaia/Itumbiara | Reator LTN | 32,00 | 800,00 |
| Samambaia | Barra | Reator 1 | 136,00 | 3400,00 |
| Samambaia | Barra | Reator 2 | 73,53 | 1838,25 |
| SE Paracatu 4 | LT Paracatu 4/ Pirapora 2 | Reator LT | 100,10 | 2502,50 |
| SE Paracatu 4 | LT Emborcação/ Paracatu 4 | Reator LT | 136,00 | 3400,00 |
| SE Paracatu 4 | LT Emborcação/ Paracatu 4 | Reator LTN | 32,00 | 800,00 |
| SE Pirapora 2 | LT Paracatu 4/ Pirapora 2 | Reator LT | 100,10 | 2502,50 |
| Serra da Mesa | LT1 Gurupi/Serra da Mesa | Reator LT1 | 169,53 | 4238,25 |
| Serra da Mesa | LT2 Gurupi/Serra da Mesa | Reator LT2 | 169,53 | 4238,25 |
| Serra da Mesa 2 | Barra | Reator 1 | 73,53 | 1838,25 |
| Serra da Mesa 2 | Barra | Reator 2 | 73,53 | 1838,25 |
| Serra da Mesa 2 | Barra | Reator 3 | 111,33 | 2783,25 |
| Serra da Mesa 2 | LT Serra da Mesa 2/ Luziânia | Reator LT | 73,58 | 1839,59 |
| Serra da Mesa 2 | LT Serra da Mesa 2/ Luziânia | Reator LTN | 32,00 | 800,00 |

Fonte: ONS (2018).

A.2 Linhas de Transmissão

As Linhas de Transmissão serão modeladas usando a rotina *Line Constants* do ATPDRAWTM. Essa rotina gera as matrizes de impedância e admitância a partir dos valores de indutância, condutância e capacitância de um arranjo arbitrário de condutores de uma Linha de Transmissão aérea. Essas matrizes podem ser reduzidas para encontrar os equivalentes de fase, componentes modais e componentes simétricos.

A rotina *Line Constants* foi implementada a partir do *LCC Template* do ATPDRAWTM. Os parâmetros descritos no [Quadro 9](#) foram aplicados em todas as LTs modeladas. Os dados geométricos e os materiais das LTs estão descritos no [Quadro 9](#): número da fase, diâmetros dos condutores, agrupamento, posições dos condutores, resistência e outros. Esses dados variam de acordo com a geometria das torres. Os tópicos a seguir apresentarão os modelos de torres que serão utilizados no ATPDRAWTM.

Quadro 9 – Descrição dos ajustes dos parâmetros dos condutores das LTs *LCC Template* do ATPDRAWTM.

| Parâmetro | Ajuste | Observação |
|----------------------------|-----------------|--|
| System type | Overhead Line | Linhas de transmissão aéreas |
| #Ph: | 3 | Número de fases |
| Transposed | Sim | Considera-se que a linha aérea seja transposta. |
| Auto bundling | Sim | Ativa o recurso de agrupamento automático |
| Skin effect | Sim | Considera o efeito pelicular. |
| Segmented ground | Não | Os condutores de aterramento são continuamente aterrados. |
| Real trans. matrix: | Não | A matriz de transformação complexa completa será usada, ou seja, não será considerada apenas a parte real. |
| Units | Metric | Será usado o sistema métrico de unidades. |
| Model Type | Bergeron | Parâmetros constantes <i>KCLee</i> ou <i>Clark</i> |
| Rho | 1000 Ω m | A resistividade do solo em [Ω m] |
| Freq. init: | 60 Hz | Frequência na qual os parâmetros da linha serão calculado |

Fonte: ATPDraw (2009).

Quadro 10 – Ajustes dos parâmetros do *LCC Template* do ATPDRAW™.

| Parâmetro | Ajuste |
|------------------|--|
| Ph.no. | Número de fase (1,2,3). Deve ser selecionado 0 para o condutor para-raios. |
| Rin | Raio interno do condutor. Parâmetro deve ser ajustado devido à seleção de efeito pelicular. |
| Rout | Raio externo do condutor. |
| RESIS | Resistência do condutor [Ω/km em DC]. Deve-se utilizar o valor em DC devido à seleção de efeito pelicular. |
| Horiz | Distância horizontal [m] do centro do grupo de condutores da fase até uma referência. A referência escolhida será o centro da torre. |
| Vtower | Altura [m] do centro do grupo de condutores da fase até o solo. |
| Vmid | Altura [m] do centro do grupo de condutores da fase até o solo medidas no meio do vão (entre as duas torres) |
| Separ | Distância entre dois condutores da fase. |
| Alpha | Posição angular de um dos condutores da fase medido no sentido anti-horário a partir da linha horizontal. |
| NB | Número de condutores por fase. |

Fonte: [ATPDraw \(2009\)](#).

A.2.1 Modelo de Linha de Transmissão 1 – Modelo LT1

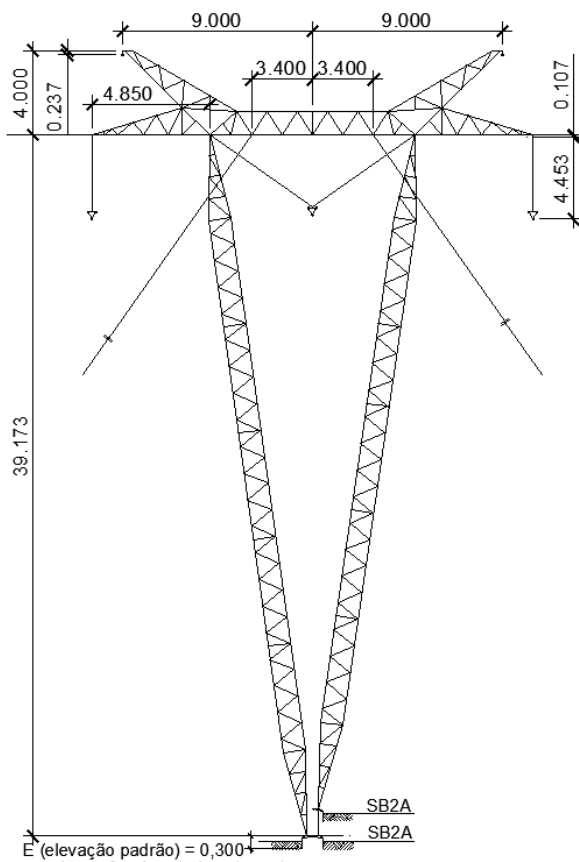
A geometria predominante das torres do Modelo de Linha de Transmissão 1 – Modelo LT1 – é apresentada na [Figura 54](#). Os condutores utilizados são do tipo CAA 900 kcmil, *Ruddy*, 45/7 e 3 condutores por fase. Os cabos para-raios são do tipo 3/8 EHS. O Modelo LT1 representa as seguintes LTs: LT 500 kV Samambaia/Emborcação; LT 500 kV Samambaia/Itumbiara. Os dados geométricos e dos materiais típicos do Modelo LT1 estão apresentados na [Tabela 13](#).

Tabela 13 – Ajustes dos parâmetros do *LCC Template* do ATPDRAWTM para o Modelo LT1, LT3, LT7 e LT8.

| Ph. No. | Rin | Rout | Resis | Horiz | Vtower | Vmid | Separ | Alpha | NB |
|----------|------|-------|-----------------------|-------|--------|-------|-------|--------------|----|
| | [cm] | [cm] | [Ω /km em DC] | [m] | [m] | [m] | [cm] | [$^\circ$] | |
| 1 | | 1,437 | 0,063 528 | -11,5 | 36,15 | 9,1 | 45,7 | 30 | 3 |
| 2 | | 1,437 | 0,063 528 | 0 | 36,15 | 9,1 | 45,7 | 30 | 3 |
| 3 | | 1,437 | 0,063 528 | 11,5 | 36,15 | 9,1 | 45,7 | 30 | 3 |
| 0 | | 0,476 | 4,2322 | -9 | 45,45 | 13,73 | 0 | 0 | 3 |
| 0 | | 0,476 | 4,2322 | 9 | 45,45 | 13,73 | 0 | 0 | 3 |

Fonte: [ETEE \(2001\)](#).

Figura 54 – Geometria de Torre do Modelo LT1

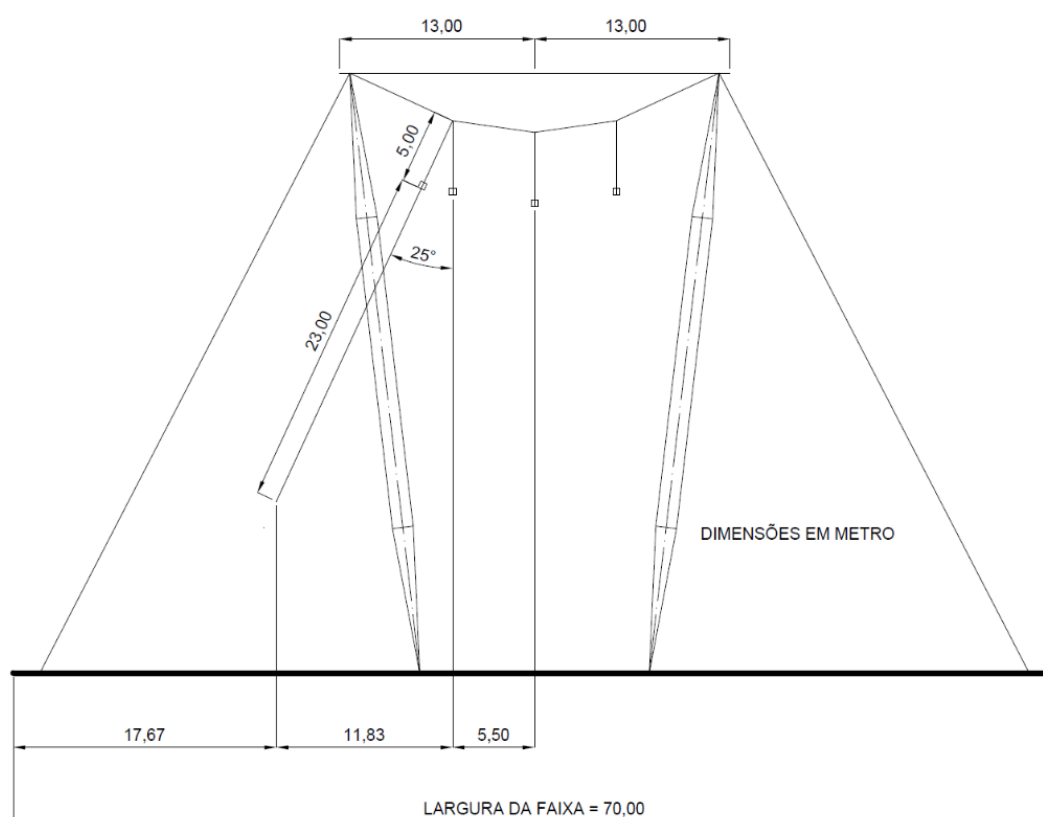


Fonte: ETEE (2001).

A.2.2 Modelo de Linha de Transmissão 2 – Modelo LT2

A geometria predominante das torres do Modelo de Linha de Transmissão 2 – Modelo LT2 – é apresentada na [Figura 55](#). Os condutores utilizados são do tipo CAA 954 kmil, *Rail*, 45/7 e 4 condutores por fase. Os cabos para-raios são do tipo 3/8 EAR. O Modelo LT2 representa as seguintes LTs: LT 500 kV Serra da Mesa 2/Luziânia; LT 500 kV Samambaia/Luziânia; LT 500 kV Luziânia/Paracatu 4; LT 500 kV Paracatu 4/Emborcação. Os dados geométricos e dos materiais típicos do Modelo LT2 estão apresentados na [Tabela 14](#).

Figura 55 – Geometria de Torre do Modelo LT2.



Fonte: SMTE (2007).

A.2.3 Modelo de Linha de Transmissão 3 – Modelo LT3

A geometria predominante das torres do Modelo de Linha de Transmissão 3 – Modelo LT3 – é apresentada na [Figura 54](#). Os condutores utilizados são do tipo CAA 954 kmil, *Rail*, 45/7 e 3 condutores por fase. Os cabos para-raios são do tipo 3/8 EAR. O Modelo LT3 representa a LT 500 kV Paracatu 4/Pirapora 2. Os dados geométricos e dos materiais típicos do Modelo LT3 estão apresentados na [Tabela 15](#).

Tabela 14 – Ajustes dos parâmetros do *LCC Template* do ATPDRAWTM para o Modelo LT2.

| Ph. No. | Rin [cm] | Rout [cm] | Resis [Ω/km em DC] | Horiz [m] | Vtower [m] | Vmid [m] | Separ [cm] | Alpha [°] | NB |
|----------------|--------------------|---------------------|------------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|----------------------|---------------------|-----------|
| 1 | 0 | 1,4795 | 0,066 652 | -5,5 | 29,72 | 10,73 | 45,7 | 45 | 4 |
| 2 | 0 | 1,4795 | 0,066 652 | 0 | 28,72 | 9,73 | 45,7 | 45 | 4 |
| 3 | 0 | 1,4795 | 0,066 652 | 5,5 | 29,72 | 10,73 | 45,7 | 45 | 4 |
| 0 | 0 | 0,4572 | 4,2322 | -13 | 37,99 | 22,22 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0,4572 | 4,2322 | 13 | 37,99 | 22,22 | 0 | 0 | 0 |

Fonte: SMTE (2007).

Tabela 15 – Ajustes dos parâmetros do *LCC Template* do ATPDRAWTM para o Modelo LT3.

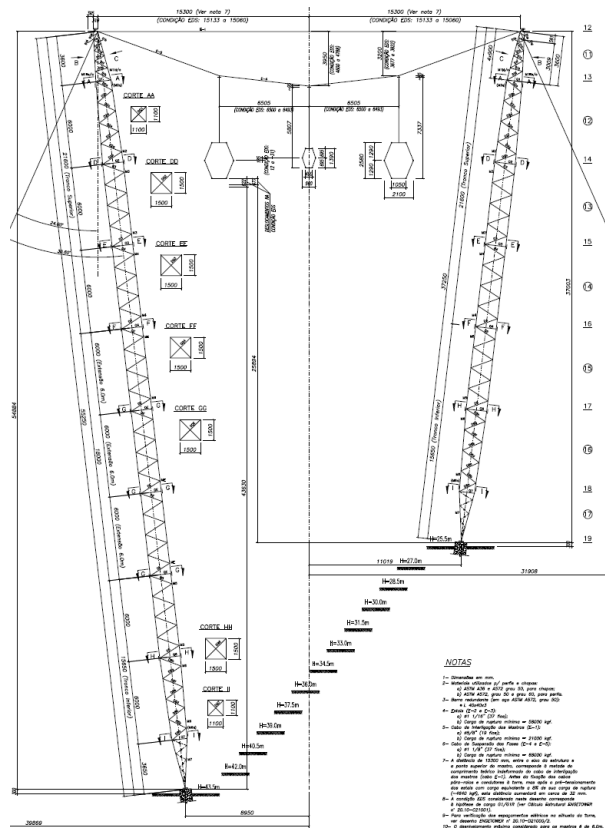
| Ph. No. | Rin [cm] | Rout [cm] | Resis [Ω/km em DC] | Horiz [m] | Vtower [m] | Vmid [m] | Separ [cm] | Alpha [°] | NB |
|----------------|--------------------|---------------------|------------------------------|---------------------|----------------------|--------------------|----------------------|---------------------|-----------|
| 1 | | 1,437 | 0,069 77 | -10,6 | 33,5 | 9,5 | 45,7 | 30 | 3 |
| 2 | | 1,437 | 0,069 77 | 0 | 33,5 | 9,5 | 45,7 | 30 | 3 |
| 3 | | 1,437 | 0,069 77 | 10,6 | 33,5 | 9,5 | 45,7 | 30 | 3 |
| 0 | | 0,476 | 3,66 | -9 | 43,5 | 14,13 | 0 | 0 | 3 |
| 0 | | 0,476 | 3,66 | 9 | 43,5 | 14,13 | 0 | 0 | 3 |

Fonte: SPTE (2009).

A.2.4 Modelo de Linha de Transmissão 4 – Modelo LT4

A geometria predominante das torres do Modelo de Linha de Transmissão 4 – Modelo LT4 – é apresentada na [Figura 56](#). Os condutores utilizados são do tipo CAA 954 kcmil, *Rail*, 45/7, 6 condutores por fase. Os cabos para-raios são do tipo 3/8 EAR. O modelo LT4 representa a LT 500 kV Rio das Éguas/Luziânia. Os dados geométricos e dos materiais típicos do Modelo LT4 estão apresentados na [Tabela 16](#).

Figura 56 – Geometria de Torre do Modelo LT4.



Fonte: PTE (2017).

Tabela 16 – Ajustes dos parâmetros do *LCC Template* do ATPDRAWTM para o Modelo LT4.

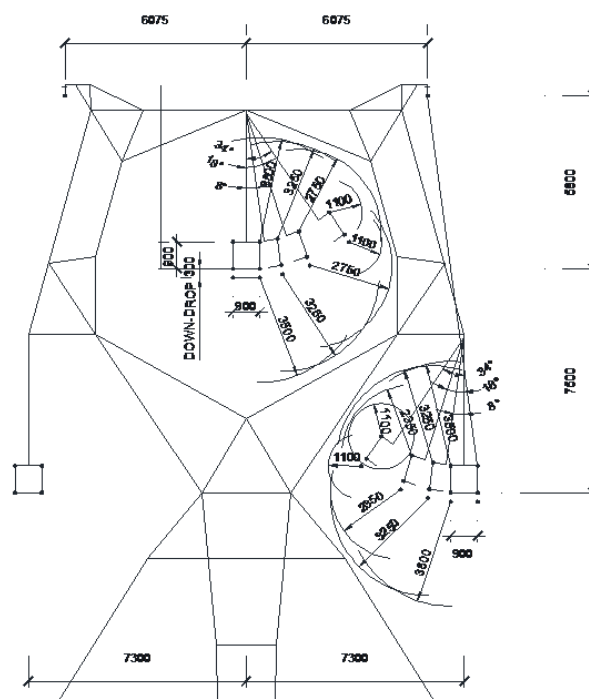
| Cable | Ph. No. | Rin | out | Resis | Horiz | Vtower | Vmid |
|--------------|----------------|------------|------------|-----------------------|--------------|---------------|-------------|
| | | [cm] | [cm] | [Ω /km em DC] | [m] | [m] | [m] |
| 1 | 1 | 0 | 1,437 | 0,069 77 | -7,03 | 32,963 | 12,963 |
| 2 | 1 | 0 | 1,437 | 0,069 77 | -5,98 | 32,963 | 12,963 |
| 3 | 1 | 0 | 1,437 | 0,069 77 | -7,555 | 34,253 | 14,253 |
| 4 | 1 | 0 | 1,437 | 0,069 77 | -5,455 | 34,253 | 14,253 |
| 5 | 1 | 0 | 1,437 | 0,069 77 | -7,03 | 35,543 | 15,543 |
| 6 | 1 | 0 | 1,437 | 0,069 77 | -5,98 | 35,543 | 15,543 |
| 7 | 2 | 0 | 1,437 | 0,069 77 | -0,245 | 33,743 | 13,743 |
| 8 | 2 | 0 | 1,437 | 0,069 77 | 0,245 | 33,743 | 13,743 |
| 9 | 2 | 0 | 1,437 | 0,069 77 | -0,48 | 34,438 | 14,438 |
| 10 | 2 | 0 | 1,437 | 0,069 77 | 0,48 | 34,438 | 14,438 |
| 11 | 2 | 0 | 1,437 | 0,069 77 | -0,245 | 35,133 | 15,133 |
| 12 | 2 | 0 | 1,437 | 0,069 77 | 0,245 | 35,133 | 15,133 |
| 13 | 3 | 0 | 1,437 | 0,069 77 | 5,98 | 32,963 | 12,963 |
| 14 | 3 | 0 | 1,437 | 0,069 77 | 7,03 | 32,963 | 12,963 |
| 15 | 3 | 0 | 1,437 | 0,069 77 | 5,455 | 34,253 | 14,253 |
| 16 | 3 | 0 | 1,437 | 0,069 77 | 7,555 | 34,253 | 14,253 |
| 17 | 3 | 0 | 1,437 | 0,069 77 | 5,98 | 35,543 | 15,543 |
| 18 | 3 | 0 | 1,437 | 0,069 77 | 7,03 | 35,543 | 15,543 |
| 19 | 0 | 0 | 0,476 | 3,66 | -15,3 | 43,5 | 14,13 |
| 20 | 0 | 0 | 0,476 | 3,66 | 15,3 | 43,5 | 14,13 |

Fonte: PTE (2017).

A.2.5 Modelo de Linha de Transmissão 5 – Modelo LT5

A geometria predominante das torres do Modelo de Linha de Transmissão 5 – Modelo LT5 – é apresentada na [Figura 57](#). Os condutores utilizados são do tipo ACAR 1050 kmil, 18/19 e 4 condutores por fase. Os cabos para-raios são do tipo 3/8 EAR. O Modelo LT5 representa a LT 500 kV Luziânia/Pirapora 2. Os dados geométricos e dos materiais típicos do Modelo LT5 estão apresentados na [Tabela 17](#).

Figura 57 – Geometria de Torre do Modelo LT5.



Fonte: [PTE \(2016\)](#).

Tabela 17 – Ajustes dos parâmetros do *LCC Template* do ATPDRAW™ para o Modelo LT5.

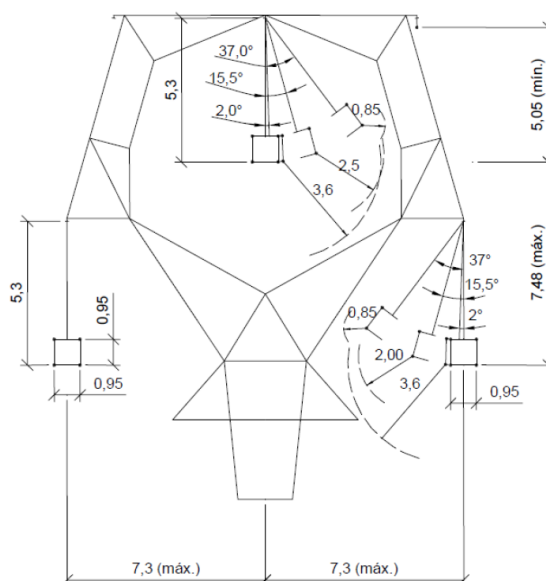
| Ph. No. | Rin | Rout | Resis | Horiz | Vtower | Vmid | Separ | Alpha | NB |
|---------|------|----------|--------------|-------|--------|------|-------|-------|----|
| | [cm] | [cm] | [Ω/km em DC] | [m] | [m] | [m] | [cm] | [°] | |
| 1 | 0 | 1,479 55 | 0,061 143 | -7,3 | 35,13 | 21 | 90 | 45 | 4 |
| 2 | 0 | 1,479 55 | 0,061 143 | 0 | 42,63 | 28,7 | 90 | 45 | 4 |
| 3 | 0 | 1,479 55 | 0,061 143 | 7,3 | 35,13 | 21 | 90 | 45 | 4 |
| 0 | 0 | 0,4572 | 3,66 | -6,08 | 48,43 | 34,3 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0,4572 | 3,66 | 6,08 | 48,43 | 34,3 | 0 | 0 | 0 |

Fonte: [PTE \(2016\)](#).

A.2.6 Modelo de Linha de Transmissão 6 – Modelo LT6

A geometria predominante das torres do Modelo de Linha de Transmissão 6 – Modelo LT6 – é apresentada na [Figura 58](#). Os condutores utilizados são do tipo CAA 954 kcmil, *Rail*, 45/7, 4 condutores por fase. Os cabos para-raios são do tipo 3/8 EAR. O Modelo LT6 representa as seguintes LTs: LT 500 kV Gurupi/Peixe 2; LT 500 kV Peixe 2/Serra da Mesa 2. Os dados geométricos e dos materiais típicos do Modelo LT6 estão apresentados na [Tabela 18](#).

Figura 58 – Geometria de Torre do Modelo LT6.



Fonte: [Guimarães \(2016\)](#).

Tabela 18 – Ajustes dos parâmetros do *LCC Template* do ATPDRAW™ para o Modelo LT6.

| Ph. No. | Rin | Rout | Resis | Horiz | Vtower | Vmid | Separ | Alpha | NB |
|---------|------|----------|--------------|-------|--------|-------|-------|-------|----|
| | [cm] | [cm] | [Ω/km em DC] | [m] | [m] | [m] | [cm] | [°] | |
| 1 | | 1,479 55 | 0,061 143 | -7,3 | 35,02 | 10 | 95 | 45 | 4 |
| 2 | | 1,479 55 | 0,061 143 | 0 | 42,52 | 17,5 | 95 | 45 | 4 |
| 3 | | 1,479 55 | 0,061 143 | 7,3 | 35,02 | 10 | 95 | 45 | 4 |
| 0 | | 0,4572 | 3,66 | -5,6 | 48,02 | 31,02 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | | 0,4572 | 3,66 | 5,6 | 48,02 | 31,02 | 0 | 0 | 0 |

Fonte: [Guimarães \(2016\)](#).

A.2.7 Modelo de Linha de Transmissão 7 – Modelo LT7

A geometria predominante das torres do Modelo de Linha de Transmissão 7 – Modelo LT7 – é apresentada na [Figura 54](#). Os condutores utilizados são do tipo CAA 954 kcmil, *Rail*, 45/7, 4 condutores por fase. Os cabos para-raios são do tipo 3/8 EHS. O Modelo LT7 representa as seguintes LTs: LT2 500 kV Gurupi/Serra da Mesa; LT2 500 kV Serra da Mesa/Samambaia; LT3 Serra da Mesa/Samambaia. Os dados geométricos e dos materiais típicos do Modelo LT7 estão apresentados na [Tabela 19](#).

Tabela 19 – Ajustes dos parâmetros do *LCC Tamplate* do ATPDRAW™ para o Modelo LT7.

| Ph. No. | Rin [cm] | Rout [cm] | Resis [Ω/km em DC] | Horiz [m] | Vtower [m] | Vmid [m] | Separ [cm] | Alpha [°] | NB |
|---------|-------------|--------------|-----------------------|--------------|---------------|-------------|---------------|--------------|----|
| 1 | | 1,479 55 | 0,061 14 | -11,5 | 30 | 10 | 120 | 45 | 4 |
| 2 | | 1,479 55 | 0,061 14 | 0 | 30 | 10 | 120 | 45 | 4 |
| 3 | | 1,479 55 | 0,061 14 | 11,5 | 30 | 10 | 120 | 45 | 4 |
| 0 | | 0,476 | 4,232 | -8,8 | 39,35 | 19,35 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | | 0,476 | 4,232 | 8,8 | 39,35 | 19,35 | 0 | 0 | 0 |

Fonte: [Guimarães \(2016\)](#).

A.2.8 Modelo de Linha de Transmissão 8 – Modelo LT8

A geometria predominante das torres do Modelo de Linha de Transmissão 8 – Modelo LT8 – é apresentada na [Figura 54](#). Os condutores utilizados são do tipo CAA 954 kcmil, *Rail*, 45/7, 4 condutores por fase. Os cabos para-raios são do tipo 3/8 EAR. O Modelo LT8 representa a LT 500 kV Serra da Mesa/Serra da Mesa 2. Os dados geométricos e dos materiais típicos do Modelo LT8 estão apresentados na [Tabela 20](#).

Tabela 20 – Ajustes dos parâmetros do *LCC Tamplate* do ATPDRAW™ para o Modelo LT8.

| Ph. No. | Rin [cm] | Rout [cm] | Resis [Ω/km em DC] | Horiz [m] | Vtower [m] | Vmid [m] | Separ [cm] | Alpha [°] | NB |
|---------|-------------|--------------|-----------------------|--------------|---------------|-------------|---------------|--------------|----|
| 1 | | 1,479 55 | 0,061 143 | -11,5 | 23 | 9,5 | 110 | 45 | 4 |
| 2 | | 1,479 55 | 0,061 143 | 0 | 23 | 9,5 | 110 | 45 | 4 |
| 3 | | 1,479 55 | 0,061 143 | 11,5 | 23 | 9,5 | 100 | 45 | 4 |
| 0 | | 0,4572 | 3,66 | -8,8 | 32,35 | 23,35 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | | 0,4572 | 3,66 | 8,8 | 32,35 | 23,35 | 0 | 0 | 0 |

Fonte: [Guimarães \(2016\)](#).

A.2.9 Resultados obtidos

A [Figura 59](#) apresenta a matriz de impedância e [Figura 60](#) apresenta a matriz de susceptância geradas pela rotina *Line Constants* do ATPDRAW™ para o Modelo LT1. Esses resultados representam as impedâncias e as susceptâncias próprias e mútuas de um trecho de linha não transposta.

Figura 59 – Exemplo da matriz de impedância gerada pela rotina *Line Constants* do ATPDRAW™.

```

Impedance matrix, in units of [ohms/kmeter] for the system of equivalent phase conductors.
Rows and columns proceed in the same order as the sorted input.
1  1.431173E-01
   7.064780E-01
2  1.215436E-01  1.444599E-01
   3.697541E-01  7.055187E-01
3  1.195336E-01  1.215436E-01  1.431173E-01
   3.181897E-01  3.697541E-01  7.064780E-01
    
```

Fonte: Autor.

Figura 60 – Exemplo da matriz de susceptância gerada pela rotina *Line Constants* do ATPDRAW™.

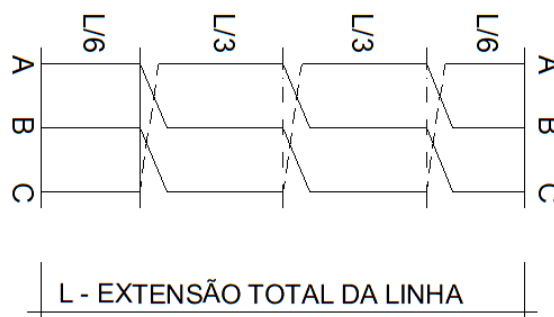
```

Susceptance matrix, in units of [mhos/kmeter] for the system of equivalent phase conductors.
Rows and columns proceed in the same order as the sorted input.
1  4.218705E-06
2 -6.587342E-07  4.282493E-06
3 -1.837361E-07 -6.587342E-07  4.218705E-06
    
```

Fonte: Autor.

As LTs apresentadas são transpostas por seguimento, conforme mostrado na [Figura 61](#). Nas simulações considerando essa condição, foram construídas matrizes para cada trecho considerando a posição do grupo de condutores de cada fase. Nas simulações considerando a LT perfeitamente transposta, utilizou-se (A.1), (A.2) e (A.3).

Figura 61 – Exemplo de esquema de transposição.



Fonte: SMTE (2007).

$$Z_{Labc} = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

$$Y_{Labc} = \begin{bmatrix} Y_s & Y_m & Y_m \\ Y_m & Y_s & Y_m \\ Y_m & Y_m & Y_s \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

$$\begin{aligned} Z_s &= \frac{1}{3}(Z_{11} + Z_{22} + Z_{33}) \\ Z_m &= \frac{1}{3}(Z_{12} + Z_{13} + Z_{23}) \\ Y_s &= \frac{1}{3}(Y_{11} + Y_{22} + Y_{33}) \\ Y_m &= \frac{1}{3}(Y_{12} + Y_{13} + Y_{23}) \end{aligned} \quad (\text{A.3})$$

A [Figura 62](#) apresenta os parâmetros de sequência zero e sequência positiva gerados pela rotina *Line Constants* do ATPDRAWTM para o Modelo LT1 considerando a LT perfeitamente transposta. A resistência – R – e a reatância – X – são apresentadas em ohms por unidade de comprimento – Ω/km – e a susceptância – B – é representada em Siemens por unidade de comprimento – S/km . A condutância da LT é desprezada nesse modelo. Os parâmetros calculados para os modelos estudados estão apresentados na [Tabela 22](#). A partir desses dados é possível calcular as impedâncias – Z – e as admitâncias – Y – da LT, conforme apresentado em [\(A.4\)](#), [\(A.5\)](#) e [\(A.6\)](#) e [\(A.7\)](#).

$$Z_0 = R_0 + X_{0j} \quad (\text{A.4})$$

$$Z_1 = R_1 + X_{1j} \quad (\text{A.5})$$

$$Y_0 = B_{0j} \quad (\text{A.6})$$

$$Y_1 = B_{1j} \quad (\text{A.7})$$

A impedância característica – Z_c , em Ω , independe do comprimento da LT e é obtida pela rotina *Line Constants* do ATPDRAWTM ([Figura 62](#)), ou utilizando [\(A.8\)](#) e [\(A.9\)](#). Os valores de impedância e admitância são aplicados em [\(A.10\)](#) e [\(A.11\)](#) para calcular os coeficientes de propagação – γ – em $1/\text{km}$. Os resultados encontrados estão apresentados na [Tabela 23](#). A [Tabela 24](#) apresenta a impedância de sequência positiva e zero das LTs calculadas com a rotina *Line Constants* do ATPDRAWTM e a [Tabela 25](#)

Tabela 21 – Impedância e susceptância mutuas e próprias por unidade de comprimento das linhas de transmissão, calculadas com a rotina *Line Constants* do ATPDRAW™.

| Parâmetro | LT1 | LT2 | LT3 | LT4 | LT5 | LT6 | LT7 | LT8 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| R_m [Ω/km] | 0,121 | 0,113 | 0,127 | 0,117 | 0,124 | 0,117 | 0,116 | 0,118 |
| X_m [Ω/km] | 0,353 | 0,412 | 0,350 | 0,392 | 0,361 | 0,365 | 0,355 | 0,349 |
| R_s [Ω/km] | 0,144 | 0,130 | 0,152 | 0,130 | 0,142 | 0,133 | 0,133 | 0,134 |
| X_s [Ω/km] | 0,706 | 0,680 | 0,697 | 0,584 | 0,631 | 0,631 | 0,623 | 0,622 |
| Y_m [$\mu\text{S}/\text{km}$] | -0,500 | -1,142 | -0,537 | -1,834 | -1,007 | -1,000 | -0,814 | -0,753 |
| Y_s [$\mu\text{S}/\text{km}$] | 4,240 | 5,032 | 4,283 | 6,879 | 5,092 | 5,208 | 5,492 | 5,461 |
| R_{aa} [Ω/km] | 0,143 | 0,130 | 0,152 | 0,130 | 0,137 | 0,128 | 0,132 | 0,133 |
| X_{aa} [Ω/km] | 0,706 | 0,680 | 0,697 | 0,570 | 0,634 | 0,633 | 0,624 | 0,623 |
| R_{bb} [Ω/km] | 0,144 | 0,130 | 0,153 | 0,129 | 0,154 | 0,141 | 0,135 | 0,136 |
| X_{bb} [Ω/km] | 0,706 | 0,680 | 0,697 | 0,612 | 0,625 | 0,626 | 0,622 | 0,621 |
| R_{cc} [Ω/km] | 0,143 | 0,130 | 0,152 | 0,130 | 0,137 | 0,128 | 0,132 | 0,133 |
| X_{cc} [Ω/km] | 0,706 | 0,680 | 0,697 | 0,570 | 0,634 | 0,633 | 0,624 | 0,623 |
| R_{ab} [Ω/km] | 0,122 | 0,113 | 0,128 | 0,117 | 0,127 | 0,119 | 0,117 | 0,119 |
| X_{ab} [Ω/km] | 0,370 | 0,429 | 0,367 | 0,409 | 0,368 | 0,373 | 0,372 | 0,366 |
| R_{bc} [Ω/km] | 0,122 | 0,113 | 0,128 | 0,117 | 0,127 | 0,119 | 0,117 | 0,119 |
| X_{bc} [Ω/km] | 0,370 | 0,429 | 0,367 | 0,409 | 0,368 | 0,373 | 0,372 | 0,366 |
| R_{ca} [Ω/km] | 0,120 | 0,113 | 0,126 | 0,117 | 0,118 | 0,112 | 0,115 | 0,117 |
| X_{ca} [Ω/km] | 0,318 | 0,378 | 0,315 | 0,358 | 0,348 | 0,351 | 0,321 | 0,315 |
| Y_{aa} [$1 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$] | 4,219 | 4,902 | 4,261 | 6,966 | 4,968 | 5,167 | 5,415 | 5,390 |
| Y_{bb} [$1 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$] | 4,282 | 5,292 | 4,327 | 6,707 | 5,340 | 5,290 | 5,647 | 5,601 |
| Y_{cc} [$1 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$] | 4,219 | 4,902 | 4,261 | 6,966 | 4,968 | 5,167 | 5,415 | 5,390 |
| Y_{ab} [$1 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$] | -0,659 | -1,459 | -0,706 | -2,332 | -1,144 | -1,176 | -1,096 | -1,019 |
| Y_{bc} [$1 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$] | -0,659 | -1,459 | -0,706 | -2,332 | -1,144 | -1,176 | -1,096 | -1,019 |
| Y_{ca} [$1 \times 10^{-6} \text{ S}/\text{km}$] | -0,184 | -0,508 | -0,199 | -0,837 | -0,731 | -0,648 | -0,251 | -0,222 |

Fonte: Autor.

apresenta os valores dessas impedâncias na base de dados do ONS (ONS, 2018). Observa-se que os valores encontrados com os modelos utilizados são próximos dos valores da base de dados do ONS.

$$Z_{C0} = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}} \quad (\text{A.8})$$

$$Z_{C1} = \sqrt{\frac{Z_1}{Y_1}} \quad (\text{A.9})$$

Figura 62 – Exemplo dos parâmetros de sequência zero e sequência positiva gerados pela rotina *Line Constants* do ATPDRAW™.

| Sequence magnitude (ohm) | Surge impedance angle (degr.) | Attenuation db/km | velocity km/sec | Wavelength km | Resistance ohm/km | Reactance ohm/km | Susceptance mho/km |
|--------------------------|-------------------------------|-------------------|-----------------|---------------|-------------------|------------------|--------------------|
| Zero : | 6.72043E+02 | -7.63540E+00 | 2.51228E-03 | 1.74730E+05 | 2.91217E+03 | 3.85312E-01 | 1.41129E+00 |
| Positive: | 2.73396E+02 | -1.83592E+00 | 3.60640E-04 | 2.91038E+05 | 4.85064E+03 | 2.26912E-02 | 3.53592E-01 |

Fonte: Autor.

Tabela 22 – Resistência, reatância e susceptância de sequência positiva e zero por unidade de comprimento das linhas de transmissão calculadas com a rotina *Line Constants* do ATPDRAW™.

| Parâmetro | LT1 | LT2 | LT3 | LT4 | LT5 | LT6 | LT7 | LT8 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| R_0 [Ω /km] | 0,385 | 0,356 | 0,407 | 0,364 | 0,390 | 0,366 | 0,365 | 0,370 |
| X_0 [Ω /km] | 1,411 | 1,505 | 1,397 | 1,369 | 1,353 | 1,362 | 1,333 | 1,320 |
| R_1 [Ω /km] | 0,023 | 0,017 | 0,025 | 0,012 | 0,018 | 0,016 | 0,016 | 0,016 |
| X_1 [Ω /km] | 0,354 | 0,268 | 0,347 | 0,191 | 0,270 | 0,266 | 0,268 | 0,273 |
| B_0 [μ S/km] | 3,239 | 2,748 | 3,209 | 3,212 | 3,079 | 3,208 | 3,864 | 3,955 |
| B_1 [μ S/km] | 4,740 | 6,174 | 4,820 | 8,713 | 6,099 | 6,208 | 6,307 | 6,214 |

Fonte: Autor.

$$\gamma_0 = \sqrt{Z_0 Y_0} \tag{A.10}$$

$$\gamma_1 = \sqrt{Z_1 Y_1} \tag{A.11}$$

Tabela 23 – Impedâncias características e constante de propagação de sequência positiva e zero das LTs calculadas com a rotina *Line Constants* do ATPDRAW™.

| Parâmetro | LT1 | LT2 | LT3 | LT4 | LT5 | LT6 | LT7 | LT8 |
|----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $\Re\{Z_{e0}\}$ [Ω] | 666,085 | 745,000 | 666,601 | 658,411 | 669,608 | 657,226 | 592,702 | 583,207 |
| $\Im\{Z_{e0}\}$ [Ω] | -89,294 | -86,872 | -95,180 | -86,026 | -94,628 | -86,702 | -79,760 | -80,232 |
| $\Re\{\gamma_0\}$ 10^{-3} 1/km | 0,289 | 0,239 | 0,305 | 0,276 | 0,291 | 0,278 | 0,308 | 0,317 |
| $\Im\{\gamma_0\}$ 10^{-3} 1/km | 2,158 | 2,047 | 2,139 | 2,115 | 2,062 | 2,108 | 2,290 | 2,306 |
| $\Re\{Z_{e1}\}$ [Ω] | 273,255 | 208,428 | 268,641 | 148,323 | 210,385 | 206,922 | 206,420 | 209,866 |
| $\Im\{Z_{e1}\}$ [Ω] | -8,759 | -6,724 | -9,575 | -4,772 | -7,150 | -6,246 | -6,248 | -6,177 |
| $\Re\{\gamma_1\}$ 10^{-3} 1/km | 0,042 | 0,042 | 0,046 | 0,042 | 0,044 | 0,039 | 0,039 | 0,038 |
| $\Im\{\gamma_1\}$ 10^{-3} 1/km | 1,295 | 1,287 | 1,295 | 1,292 | 1,283 | 1,285 | 1,302 | 1,304 |

Fonte: Autor.

Tabela 24 – Impedâncias de sequência positiva e zero das LTs calculadas com a rotina *Line Constants* do ATPDRAWTM.

| Linha de Transmissão | Modelo | km | R_0 [% pu] | X_0 [% pu] | R_1 [% pu] | X_d'' [% pu] |
|-----------------------------------|--------|---------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| LT1 Gurupi/Serra da Mesa | LT7 | 255,000 | 3,726 | 13,594 | 0,166 | 2,738 |
| LT2 Gurupi/Serra da Mesa | LT7 | 255,000 | 3,726 | 13,594 | 0,166 | 2,738 |
| LT Gurupi/Peixe 2 | LT6 | 72,000 | 1,053 | 3,921 | 0,046 | 0,765 |
| LT Peixe 2/Serra da Mesa 2 | LT6 | 195,000 | 2,852 | 10,621 | 0,125 | 2,072 |
| LT Serra da Mesa 2/ Rio das Ég. | LT6 | 230,000 | 3,364 | 12,527 | 0,148 | 2,443 |
| LT Rio das Éguas/Luziânia | LT4 | 368,000 | 5,356 | 20,148 | 0,182 | 2,819 |
| LT Barreiras/ Rio das Éguas | LT4 | 239,800 | 3,490 | 13,129 | 0,118 | 1,837 |
| LT Serra da Mesa 2/ Luziânia | LT2 | 313,800 | 4,465 | 18,885 | 0,217 | 3,363 |
| LT Serra da Mesa 2/ Serra da Mesa | LT8 | 42,000 | 0,622 | 2,217 | 0,027 | 0,459 |
| LT1 Serra da Mesa/ Samambaia | LT1 | 248,000 | 3,822 | 14,000 | 0,225 | 3,508 |
| LT2 Serra da Mesa/ Samambaia | LT7 | 248,000 | 3,624 | 13,221 | 0,161 | 2,663 |
| LT3 Serra da Mesa/ Samambaia | LT7 | 248,000 | 3,624 | 13,221 | 0,161 | 2,663 |
| LT Samambaia/ Luziânia | LT2 | 67,000 | 0,953 | 4,032 | 0,046 | 0,718 |
| LT Samambaia/Emborcação | LT1 | 285,410 | 4,399 | 16,112 | 0,259 | 4,037 |
| LT Samambaia/Itumbiara | LT1 | 296,250 | 4,566 | 16,724 | 0,269 | 4,190 |
| LT Luziânia/Paracatu 4 | LT2 | 110,700 | 1,575 | 6,662 | 0,077 | 1,186 |
| LT Luziânia/Pirapora 2 | LT5 | 346,200 | 5,403 | 18,736 | 0,254 | 3,734 |
| LT Paracatu 4/ Emborcação | LT2 | 187,800 | 2,672 | 11,302 | 0,130 | 2,013 |
| LT Emborcação/ Itumbiara | LT1 | 132,000 | 2,034 | 7,452 | 0,120 | 1,867 |
| LT Paracatu 4/ Pirapora 2 | LT3 | 244,150 | 3,977 | 13,641 | 0,242 | 3,393 |

Fonte: Autor.

Tabela 25 – Impedâncias de sequência positiva e zero das LTs de acordo com a base de dados do ONS.

| Linha de Transmissão | R_0 [% pu] | X_0 [% pu] | R_1 [% pu] | X_d'' [% pu] |
|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| LT1 Gurupi/Serra da Mesa | 3,580 | 14,610 | 0,176 | 2,690 |
| LT2 Gurupi/Serra da Mesa | 3,750 | 10,940 | 0,180 | 2,760 |
| LT Gurupi/Peixe 2 | 1,192 | 3,827 | 0,048 | 0,750 |
| LT Peixe 2/Serra da Mesa 2 | 2,659 | 10,070 | 0,140 | 2,053 |
| LT Serra da Mesa 2/ Rio das Ég. | 2,696 | 11,415 | 0,130 | 2,249 |
| LT Rio das Éguas/Luziânia | 4,449 | 15,750 | 0,189 | 2,717 |
| LT Barreiras/ Rio das Éguas | 2,828 | 10,140 | 0,122 | 1,758 |
| LT Serra da Mesa 2/ Luziânia | 4,281 | 18,260 | 0,201 | 3,256 |
| LT Serra da Mesa 2/ Serra da Mesa | 0,593 | 2,416 | 0,027 | 0,466 |
| LT1 Serra da Mesa/ Samambaia | 4,124 | 10,797 | 0,229 | 3,393 |
| LT2 Serra da Mesa/ Samambaia | 3,796 | 11,965 | 0,170 | 2,586 |
| LT3 Serra da Mesa/ Samambaia | 3,712 | 12,156 | 0,170 | 2,601 |
| LT Samambaia/ Luziânia | 0,946 | 4,016 | 0,045 | 0,717 |
| LT Samambaia/Emborcação | 5,095 | 18,742 | 0,280 | 3,957 |
| LT Samambaia/Itumbiara | 5,285 | 19,430 | 0,290 | 4,096 |
| LT Luziânia/Paracatu 4 | 1,550 | 6,620 | 0,075 | 1,186 |
| LT Luziânia/Pirapora 2 | 4,647 | 14,320 | 0,221 | 3,576 |
| LT Paracatu 4/ Emborcação | 2,542 | 11,040 | 0,125 | 1,996 |
| LT Emborcação/ Itumbiara | 1,860 | 7,030 | 0,130 | 1,920 |
| LT Paracatu 4/ Pirapora 2 | 3,436 | 13,325 | 0,232 | 3,357 |

Fonte: ONS (2018)