



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA  
Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa  
Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica

BRENDA COSTA VITOR

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS DISPOSITIVOS DE  
MEDIÇÃO NA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM  
LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO FILTRO DS  
E TEORIA DAS ONDAS VIAJANTES**

Bom Jesus da Lapa-BA  
Fevereiro de 2025

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA**

Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa

Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica

Brenda Costa Vitor

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO  
NA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO  
UTILIZANDO FILTRO DS E TEORIA DAS ONDAS VIAJANTES**

*Trabalho de conclusão de curso apresentada ao Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica do Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa da Universidade Federal do Oeste da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.*

Orientadora: Profa. Ma. Andressa Pereira Oliveira

Bom Jesus da Lapa-BA  
Fevereiro de 2025

## FICHA CATALOGRÁFICA

---

V845

Vitor, Brenda Costa

Análise da influência dos dispositivos de medição na localização de faltas em linhas de transmissão utilizando Filtro Ds e Teoria das Ondas Viajantes. / Brenda Costa Vitor. – 2025.

84f.: il.

Orientadora: Profa. Ma. Andressa Pereira Oliveira

TCC - Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa - BA, 2025.

1. Circuitos Elétricos. 2. Linhas de Transmissão. 3. Engenharia Elétrica. I. Oliveira, Andressa Pereira. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia – Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa - BA. III. Título.

CDD 621.3192

---

**Biblioteca Universitária de Bom Jesus da Lapa – UFOB**

# FOLHA DE APROVAÇÃO

**BRENDA COSTA VITOR**

## **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO NA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO FILTRO DS E TEORIA DAS ONDAS VIAJANTES**

Trabalho de conclusão de curso foi aprovada como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, aprovada em sua forma final pelo Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica do Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa da Universidade Federal do Oeste da Bahia.

Bom Jesus da Lapa, 25 de Fevereiro de 2025

---

Profa. Ma. Andressa Pereira Oliveira (UFOB)  
(Orientadora)

---

Prof. Dr. Erick Baleeiro da Silva (UFOB)

---

Prof. Dr. Antonio José Sobrinho de Sousa (UFOB)

---

Prof. Dr. Manoel Messias Silva Júnior (UFOB)

*Aos meus pais, por acreditarem nos meus sonhos e serem base sólida durante a minha formação. Aos meus avós, pela motivação de um sonho. Aos meus amigos e namorado, pelo apoio despendido e compreensão nas ausências necessárias.*

---

## Agradecimentos

Agradeço inicialmente aos meus pais, Vilmar Rodrigues Vitor e Geane Andrade Costa Vitor, por acreditarem em meu potencial e pelo apoio incondicional que sempre ofereceram. O caminho não foi fácil, mas conseguimos. Essa conquista também é de vocês.

Agradeço ao meu irmão, Marcelo Henrique, pela ajuda nos momentos necessários. Você foi muito importante nesse processo.

Agradeço aos meus avós por me motivarem e sempre acreditarem em mim. Enfim terão uma neta Engenheira.

Agradeço aos meus tios e primos, em especial à Luíza Vitor Rubbioli. Você foi inspiração em toda essa caminhada.

Agradeço ao meu namorado, Pablo Moreira, por me acompanhar na jornada da graduação. Você tornou o trilhar mais leve.

Agradeço a todos os meus professores pelas orientações, direcionamentos e por me instruírem no saber, mostrando que o conhecimento é o maior bem que podemos ter. Em especial, agradeço a Antônio Oliveira, por me motivar às atividades acadêmicas desde o 1º período, e a Andressa Oliveira, por todo o apoio despendido nessa caminhada. Sou imensamente grata aos orientadores que tive nessa caminhada: Adelmo Saturnino, Jarbas Fernandes, Leandro Brito, Poty Souza, Stefânia Oliveira, Andressa Oliveira e Jorge Oliveira. Acreditem sempre: a educação muda destinos!

Por fim, agradeço à Universidade Federal do Oeste da Bahia, por possibilitar um ensino interiorizado, público e de qualidade no Oeste da Bahia. Levarei com carinho cada momento proporcionado, cada vivência e cada oportunidade oferecida. Serei uma eterna admiradora e defensora dessa instituição!

*“A força não vem de vencer. Suas lutas desenvolvem suas forças. Quando você atravessa dificuldades e decide não se render, isso é força.”*

(Arnold Schwarzenegger)

---

## Resumo

O avanço tecnológico experimentado pela sociedade moderna traz consigo uma crescente dependência de energia elétrica. Para atender a essa demanda, é necessário expandir os sistemas elétricos de potência, o que implica no aumento das linhas de transmissão e distribuição. No entanto, as linhas de transmissão estão sujeitas a faltas causadas por fenômenos naturais ou fatores externos, resultando em interrupções no fornecimento de energia para os consumidores finais. Quando essas linhas se estendem por longas distâncias, a identificação de possíveis interrupções torna-se um desafio complexo. A necessidade de garantir um fornecimento de energia ininterrupto exige uma abordagem ágil e eficiente na detecção de faltas e na restauração do serviço. Alguns equipamentos de medição podem interferir na identificação de faltas no sistema, como é o caso dos Transformadores de Corrente, que podem apresentar um comportamento transitório indesejado em situações de curto-circuito, levando ao mau funcionamento de relés. Portanto, esta monografia tem como objetivo realizar um estudo de caso, por meio do qual será avaliado o impacto dos Transformadores de Corrente na identificação de faltas em linhas de transmissão de energia elétrica, por intermédio da análise dos dados característicos dos sinais de ondas viajantes de tensão e corrente. Os dados foram obtidos por simulação computacional através do *software ATPDraw*, e a análise foi realizada mediante aplicação do Filtro DS e Teoria de Ondas Viajantes, com o auxílio do *software MATLAB*<sup>®</sup>. Os resultados obtidos demonstraram que a presença dos transformadores de corrente pode influenciar a precisão na localização de faltas, tanto positiva quanto negativamente. Em determinados cenários, verificou-se que os transformadores de corrente introduzem distorções nos sinais de corrente, dificultando a identificação correta do instante de chegada das ondas viajantes e impactando a exatidão da localização da falta. No entanto, em algumas situações, a presença do transformador de corrente contribuiu para uma melhora nos resultados, reduzindo o erro na estimativa da posição da falta. A aplicação do Filtro DS mostrou-se eficaz na extração das componentes transitórias associadas às ondas viajantes, permitindo uma detecção mais precisa das frentes de onda nos terminais da linha. O uso do janelamento padrão do *MATLAB*<sup>®</sup> possibilitou uma redução significativa do ruído presente nos sinais, melhorando a definição dos instantes de chegada das ondas. Dessa forma, verificou-se que a combinação da Teoria das Ondas Viajantes com o Filtro DS representa uma abordagem robusta para a localização de faltas em linhas de transmissão, proporcionando alta acurácia mesmo na presença de transformadores de corrente.

**Palavras-chave:** Faltas em Linhas de Transmissão, Localização de faltas, Transformador de Corrente, Teoria das Ondas Viajantes, Filtro DS.

---

## Abstract

The technological advances experienced by modern society bring with them an increasing dependence on electrical energy. To meet this demand, it is necessary to expand electrical power systems, which implies an increase in transmission and distribution lines. However, transmission lines are subject to deficiencies caused by natural or external factors, resulting in interruptions without power supply to end consumers. When these lines extend over long distances, identifying potential risks becomes a complex challenge. The need to ensure uninterrupted power supply requires an agile and efficient approach to fault detection and service restoration. Some measuring equipment can interfere with the identification of faults in the system, such as Current Transformers, which can present undesirable transient behavior in short-circuit situations, leading to relay malfunction. Therefore, this monograph aims to carry out a case study, through which the impact of Current Transformers in the identification of faults in electrical power transmission lines will be evaluated, through the analysis of specific data from voltage and current traveling wave signals. The data were obtained by computer simulation using the *ATPDraw software*, and the analysis was performed by applying the DS Filter and Traveling Wave Theory, with the aid of the *MATLAB software*<sup>®</sup>. The results obtained showed that the presence of current transformers can influence the accuracy in fault location, both positively and in quality. In certain scenarios, it was ensured that the current transformers introduce distortions in the current signals, making it difficult to correctly identify the time of arrival of the waves and impacting the accuracy of the fault location. However, in some situations, the presence of the current transformer contributed to an improvement in the results, reducing the error in estimating the fault position. The application of the DS Filter proved to be effective in protecting the transient components associated with traveling waves, allowing a more accurate detection of the wave fronts at the line terminals. The use of the standard MATLAB<sup>®</sup> window allowed a significant reduction in the noise present in the signals, improving the definition of the time of arrival of the waves. In this way, it was achieved that the combination of the Traveling Wave Theory with the DS Filter represents a robust approach for locating faults in transmission lines, with high safety comfort even in the presence of current transformers.

**Keywords:** Faults in Transmission Lines, Fault location, Current Transformer, Traveling Wave Theory, DS Filter.

---

---

## Lista de Figuras

|    |  |    |
|----|--|----|
| 1  | Representação do Sistema Elétrico de Potência. . . . .   | 22 |
| 2  | Evolução da capacidade instalada no Sistema Interligado Nacional (SIN) -<br>Outubro 2023/ Dezembro 2027. . . . . | 23 |
| 3  | Mapa do sistema de transmissão - Horizonte 2027.. . . .  | 24 |
| 4  | Circuito equivalente de uma linha de transmissão curta. . . . .  | 25 |
| 5  | Circuito equivalente $\pi$ -nominal de uma linha de transmissão média. . . . .                                   | 26 |
| 6  | Circuito equivalente $\pi$ -nominal de uma linha de transmissão longa com<br>parâmetros distribuídos. . . . .    | 28 |
| 7  | Propagação da falta em Linhas de Transmissão (LT). . . . .   | 34 |
| 8  | Relé de sobrecorrente do tipo indução. . . . .   | 37 |
| 9  | Relé eletrônico. . . . .   | 38 |
| 10 | Relé digital. . . . .  | 38 |
| 11 | Esquemático relé primário. . . . .   | 39 |
| 12 | Esquemático relé secundário com contatos em paralelo. . . . .  | 39 |
| 13 | Esquemático do Transformador de Corrente. . . . .  | 40 |
| 14 | Curva de magnetização de um transformador de corrente. . . . .   | 41 |
| 15 | Forma de onda da corrente do primário em relação ao secundário de um<br>TC quando há saturação. . . . .          | 42 |
| 16 | Parâmetros da torre, dados dos cabos (raio e resistências) e parâmetros da<br>LT. . . . .                        | 46 |
| 17 | Sistema base para o estudo da localização de faltas sem equipamentos de<br>medição. . . . .                      | 46 |
| 18 | Modelagem das fontes de tensão. . . . .  | 47 |
| 19 | Modelagem da LT. . . . .   | 48 |
| 20 | ATP Settings. . . . .  | 48 |
| 21 | Subrotina LCC. . . . .   | 49 |
| 22 | Subrotina LCC - Parâmetros. . . . .  | 50 |
| 23 | Chave trifásica controlada por tempo. . . . .  | 50 |

|    |  |    |
|----|--|----|
| 24 | Sistema com falta envolvendo terra. . . . .  | 51 |
| 25 | Sistema com falta sem terra. . . . .   | 51 |
| 26 | Sistema para o estudo da localização de faltas com equipamentos de medição. . . . .  | 52 |
| 27 | Esquemático do Transformador de Corrente Saturável. . . . .  | 52 |
| 28 | Curva característica do TC. . . . .  | 52 |
| 29 | Criação do arquivo SAT.atp. . . . .  | 54 |
| 30 | Execução do SAT.atp pelo prompt de comando. . . . .  | 54 |
| 31 | Modelagem TC. . . . .  | 56 |
| 32 | Modelagem TC em <i>ATPDraw</i> . . . . .   | 57 |
| 33 | Corrente de excitação secundária. . . . .  | 57 |
| 34 | Metodologia para a localização da falta. . . . .   | 62 |
| 35 | Aplicação do filtro DS em sinais de tensão de falta AT. . . . .  | 63 |
| 36 | Erro médio (%) da localização de faltas em LT por tipo de falta em sistemas com e sem TC. . . . .  | 65 |
| 37 | Aumento de erro médio (%) com inserção de TC no sistema de LT. . . . .   | 66 |
| 38 | Erro médio (%) da localização de faltas por resistência e tipo de falta em sistema com e sem TC para ângulo de incidência a $60^\circ$ e local de incidência a 5% da LT. . . . .                               | 66 |
| 39 | Erro médio (%) da localização de faltas em LT por local de ocorrência percentual em sistema com e sem TC para faltas BT com ângulo de incidência a $60^\circ$ e resistência de falta em $100 \Omega$ . . . . . | 67 |
| 40 | Custo computacional médio total por ângulo de incidência e resistência de falta. . . . .   | 67 |
| 41 | Custo computacional de acordo com o ângulo de incidência e a resistência de falta AT a 70% da LT. . . . .  | 68 |

---

## Lista de Tabelas

|   |   |    |
|---|---|----|
| 1 | Valores de atributos de transformadores saturáveis em ATPDraw . . . . . | 56 |
| 2 | Parâmetros de variação do sistema . . . . .                             | 60 |
| 3 | Parâmetros referência do sistema . . . . .                              | 61 |

---

## Lista de abreviaturas, acrônimos e siglas

|             |                                       |
|-------------|---------------------------------------|
| <b>ATP</b>  | Alternative Transient Program         |
| <b>EMTP</b> | Electromagnetic Transients Program    |
| <b>LT</b>   | Linhas de Transmissão                 |
| <b>LKC</b>  | Lei de Kirchhoff das Correntes        |
| <b>LKT</b>  | Lei de Kirchhoff das Tensões          |
| <b>ONS</b>  | Operador Nacional do Sistema Elétrico |
| <b>SEP</b>  | Sistema Elétrico de Potência          |
| <b>SIN</b>  | Sistema Interligado Nacional          |
| <b>TCs</b>  | Transformadores de Corrente           |
| <b>TPs</b>  | Transformadores de Potencial          |
| <b>TOV</b>  | Teoria das Ondas Viajantes            |

---

## Lista de Símbolos

|            |  |
|------------|--|
| $A$        | Constante da linha   |
| $A_1$      | Constante da equação característica de tensão ou corrente              |
| $A_2$      | Constante da equação característica de tensão ou corrente              |
| $B$        | Constante da linha   |
| $C$        | Constante da linha   |
| $D$        | Constante da linha   |
| $L$ ou $l$ | Comprimento da linha   |
| $R$        | Resistência da linha   |
| $V$        | Volt   |
| $x$        | Distância de uma elemento infinitesimal da linha até a barra receptora |
| $X$        | Reatância da linha   |
| $W$        | Watt   |
| $Y$        | Admitância em derivação por fase ao neutro por unidade de comprimento  |
| $Z$        | Impedância da linha  |
| $\alpha$   | Constante de atenuação   |
| $\beta$    | Constante de fase  |
| $\gamma$   | Constante de propagação da onda  |
| $\pi$      | Pi   |
| $I_S$      | Corrente na barra transmissora   |
| $I_R$      | Corrente na barra receptora  |
| $I_L$      | Corrente na linha  |
| $V_S$      | Tensão fase-neutro na barra transmissora                               |
| $V_R$      | Tensão fase-neutro na barra receptora                                  |

|                    |                                    |
|--------------------|------------------------------------|
| $Z_c$              | Impedância característica          |
| km                 | Quilômetro                         |
| $\Delta x$         | Comprimento infinitesimal da linha |
| $z\Delta x$        | Impedância em série com a linha    |
| $y\Delta x$        | Admitância na derivação da linha   |
| $\omega L$         | Reatância da linha                 |
| $\frac{d}{dx}$     | Primeira derivada                  |
| $\frac{d^2}{dx^2}$ | Segunda derivada                   |

---

---

# Sumário

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>   | <b>17</b> |
| 1.1      | Considerações iniciais . . . . .                                      | 17        |
| 1.2      | Objetivo geral . . . . .  | 18        |
| 1.3      | Objetivos específicos . . . . .                                       | 18        |
| 1.4      | Justificativa . . . . .   | 18        |
| 1.5      | Estado da Arte . . . . .  | 19        |
| 1.6      | Organização do texto . . . . .  | 20        |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>  | <b>22</b> |
| 2.1      | Apresentação do Sistema Elétrico Brasileiro . . . . .                 | 22        |
| 2.2      | Modelagem de linha de transmissão . . . . .                           | 24        |
| 2.2.1    | Linha de transmissão curta . . . . .                                  | 25        |
| 2.2.2    | Linha de transmissão média . . . . .                                  | 26        |
| 2.2.3    | Linha de transmissão longa . . . . .                                  | 28        |
| 2.3      | Teoria das Ondas Viajantes . . . . .                                  | 30        |
| 2.3.1    | Localização de faltas no Sistema Elétrico de Potência (SEP) . . . . . | 30        |
| 2.3.2    | Métodos de identificação de faltas . . . . .                          | 31        |
| 2.3.3    | Teoria das Ondas Viajantes . . . . .                                  | 32        |
| 2.3.4    | Métodos de Ondas Viajantes para localização de faltas . . . . .       | 34        |
| 2.4      | Proteção do SEP . . . . .   | 36        |
| 2.4.1    | Relés . . . . .   | 36        |
| 2.4.1.1  | Formas de acionamento dos relés . . . . .                             | 38        |
| 2.4.2    | Transformadores de Corrente . . . . .                                 | 39        |
| 2.4.2.1  | Corrente de magnetização e saturação do TC . . . . .                  | 41        |
| 2.4.2.2  | Erros dos transformadores de corrente . . . . .                       | 42        |
| 2.5      | Filtro <i>Differentiator-Smoother (DS)</i> . . . . .                  | 43        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>3</b> | <b>MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO</b>   | <b>45</b> |
| 3.1      | Modelagem e simulação do sistema de transmissão sem equipamentos de medição em <i>Software ATPDraw</i> . . . . . | 45        |
| 3.1.1    | Modelagem do sistema base . . . . .  | 45        |
| 3.1.2    | Procedimento de modelagem no <i>ATPDraw</i> . . . . .  | 46        |
| 3.1.3    | Fontes de tensão . . . . .   | 47        |
| 3.1.4    | Linha e torre de transmissão . . . . .   | 47        |
| 3.1.4.1  | <i>Line Constants (LCC)</i> . . . . .  | 47        |
| 3.1.5    | Elementos de medição . . . . .   | 49        |
| 3.1.6    | Faltas no sistema . . . . .  | 50        |
| 3.2      | Inserção do transformador de corrente . . . . .  | 51        |
| 3.2.1    | Modelagem do Transformador de Corrente Saturável em <i>Software ATPDraw</i> . . . . .                            | 52        |
| 3.3      | Programa de processamento de dados . . . . .   | 60        |
| 3.3.1    | Procedimento para geração e simulação de arquivos em série . . . . .   | 60        |
| 3.3.1.1  | Geração de arquivos .atp em série . . . . .  | 60        |
| 3.3.1.2  | Execução de arquivos .atp em série . . . . .   | 61        |
| 3.4      | Metodologia e resultados para o sistema sem equipamentos de medição . . . . .                                    | 62        |
| 3.5      | Resultados da análise da localização de faltas em sistemas com e sem TC . . . . .                                | 65        |
| <b>4</b> | <b>CONCLUSÃO</b>   | <b>69</b> |
| <b>5</b> | <b>APÊNDICE A</b>  | <b>70</b> |
| 5.1      | Código de geração de arquivos .atp em série para sistema com faltas envolvendo terra via Matlab . . . . .        | 70        |
|          | <b>REFERÊNCIAS</b>   | <b>82</b> |

---

# INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações iniciais

A expansão do SEP foi de fundamental importância para o aumento da produtividade e aceleração do desenvolvimento econômico mundial. Em sua configuração típica, o SEP é formado por unidade de geração, transmissão e distribuição (ABRADEE, 2017). Com o crescimento contínuo do SEP, acompanhado pelo aumento de LT e distribuição, o fornecimento de energia elétrica com qualidade e continuidade tornou-se um complexo desafio frente ao mercado regulatório e de livre comercialização (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2010).

As faltas no sistema elétrico resultam em interrupções no fornecimento de energia elétrica ao consumidor final. Dentre essas interrupções, 68% estão relacionadas a faltas em linhas de transmissão, que representam o índice mais elevado entre os segmentos do Sistema Elétrico. Para que ocorra o rápido reestabelecimento da transmissão, é necessário que a falta seja identificada e localizada com agilidade e precisão por meio de equipamentos de proteção (FILHO; MAMEDE, 2020).

Atualmente, os algoritmos de localização de faltas podem ser classificados como baseados em impedância, em conhecimento e de ondas viajantes. As faltas em LT afetam os valores de tensão no ponto de ocorrência, e geram sinais de tensão e corrente em alta frequência, que se propagam pela linha em qualquer direção e em velocidade próxima à da luz, sendo denominadas ondas viajantes (DAS; SANTOSO; ANANTHAN, 2022).

Até que cheguem aos dispositivos identificadores de faltas, as ondas viajantes passam por transformadores de potencial e de corrente. Por limitações construtivas, tais equipamentos de medição apresentam um comportamento indesejado quando submetidos

a curtos-circuitos, podendo acarretar atrasos na atuação de relés e obtenção imprecisa de sinais pelos instrumentos identificadores de faltas (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2010).

## 1.2 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o impacto dos Transformadores de Corrente (TC) na identificação de faltas em linhas de transmissão de energia elétrica, por meio da análise dos dados característicos dos sinais de ondas viajantes de tensão e corrente, mediante a aplicação do Filtro *Differentiator-Smoother (DS)*, por intermédio do *software MATLAB®*. Os dados serão obtidos por simulação computacional através do *software ATPDraw*.

## 1.3 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral do trabalho, devem-se atingir alguns objetivos específicos. São eles:

- Realizar a modelagem de um modelo representativo da linha de transmissão no *software ATPDraw*, sem utilização de equipamentos de medição;
- Realizar a modelagem de um modelo representativo da linha de transmissão no *software ATPDraw*, envolvendo TC;
- Simular todos os tipos de faltas nos modelos representativos no *software ATPDraw* de forma automatizada e registrar os dados das ondas viajantes de tensão e corrente;
- Realizar a análise dos dados por meio da aplicação do Filtro DS, mediante *software MATLAB®*;
- Contrapor os resultados obtidos com e sem a utilização de transformadores de corrente.

## 1.4 Justificativa

Este estudo é motivado pela necessidade de garantir um fornecimento confiável e eficiente de energia elétrica em um sistema elétrico em expansão. É essencial minimizar os impactos das faltas nas linhas de transmissão. Compreender como os equipamentos de

medição afetam a identificação dessas faltas pode contribuir para o aperfeiçoamento do processo de identificação, reduzindo impactos negativos para os consumidores finais.

## 1.5 Estado da Arte

Chaitanya, Andanapalli e Varma (2015) propuseram um modelo de identificação de faltas em linhas de circuito duplo com medições não sincronizadas baseadas em Teoria das Ondas Viajantes (TOV), para todas as condições de falta. A ocorrência da falta é identificada e as medições são sincronizadas de forma analítica com o auxílio da Transformada Discreta de Fourier (DFT). Posteriormente a TOV foi empregada na captura do tempo de viagem dos transientes entre o ponto da falta e o relé, com uso da transformada de *Wavelet*. Para verificação do método, foi realizada a simulação por meio do *software MATLAB*<sup>®</sup>, sendo alcançadas eficácia e precisão, quando os resultados são comparados aos do trabalho de Mahamedi (2014).

Ye et al. (2015) propuseram um método de localização de faltas monofásicas fase-terra de longa duração em redes de distribuição com ondas viajantes por meio do estudo das características de transmissão do módulo de onda viajante, combinando um algoritmo de localização multiterminal para identificação da linha tronco da falta, seguido de um algoritmo para localização de faltas de terminal duplo.

Zou et al. (2016) aplicaram o método para identificação de falta baseada em ondas viajantes para linhas multiterminais com a utilização de todos os dados sincronizados nas extremidades e emprego de filtro de sequência para a extração das ondas de tensão e corrente da falta. Com o tempo de chegada do primeiro surto em cada barra, calculado com base na chegada da onda na extremidade do relé, são calculadas as distâncias das faltas, sendo um método independente das reflexões da onda.

Lopes, Küsel e Silva (2016) apresentaram o resultado da análise do desempenho de um algoritmo baseado na teoria de ondas viajantes para a localização de faltas quando aplicado a uma linha de meio comprimento de onda. Por meio da simulação de vários cenários, foi observado que as características operacionais atípicas das linhas com meio comprimento de onda não afetam os métodos baseados em linhas viajantes.

Xun et al. (2017) analisaram as características de propagação de ondas viajantes em linhas híbridas, verificando que a diferença de tempo de chegada da onda viajante inicial, e conseqüentemente a precisão do algoritmo, não sofrem influência da resistência de transição, do tipo de falta e do ângulo de fase.

Abeid, El-Ghany e Azmy (2017) propuseram um novo algoritmo para detecção de faltas *shunt* simultâneas com a união de técnicas de ondas viajantes duplas e de extremi-

dade única por meio do *software* Alternative Transient Program (ATP) - Electromagnetic Transients Program (EMTP) e técnica de processamento digital de sinais por transformada *Wavelet* do *software* *MATLAB*<sup>®</sup> na análise de sinais de alta frequência em um sistema de transmissão de 500 kV.

No método empregado, Sawai, Gore e Naidu (2020) utilizaram componentes de fase de ondas viajantes para a localização de faltas para uma linha de dois terminais. Mediante a transformada *Wavelet* complexa, é realizada a extração dos dados dos sinais de tensão e corrente de falta na extremidade do relé, onde a componente de fase da onda viajante será utilizada, por meio de sua medida, para o cálculo de distância da falta, superando o problema de sincronização do tempo.

Fedorov et al. (2021) desenvolveram métodos de identificação da frente de ondas viajantes onde a linha protegida possui uma linha mais curta em paralelo, caso este em que há redução da confiabilidade do localizador devido à dificuldade de medida precisa com a utilização de Transformadores de Potencial (TPs) indutivos e capacitivos. A abordagem apresentada pelos autores emprega a medição de frentes de corrente por Transformadores de Corrente (TCs) eletromagnéticos clássicos com largura de banda de frequência ótima para aumento da confiabilidade e precisão da localização de faltas nas linhas de transmissão.

Em seu artigo, Oliveira, Moreira e Picanço (2022) empregaram a Transformada de Hilbert-Huang na detecção e classificação de faltas em linhas de transmissão por meio da extração de dados característicos de tensão em dois terminais, associada à teoria de ondas viajantes para a localização das faltas. Foram aplicados todos os tipos de faltas, com variação do local e da resistência, entretanto não foram considerados parâmetros de carregamento do sistema, bem como não foi considerada a influência dos dispositivos de medição na análise.

## 1.6 Organização do texto

- No capítulo 01 é apresentada a introdução e o estado da arte, em que se discutem os últimos avanços referentes à identificação de faltas e a influência dos equipamentos de medição;
- No capítulo 02, encontra-se a fundamentação teórica, que aborda os sistemas elétricos de potência, as proteções do SEP em linhas de transmissão, a teoria de ondas viajantes, a influência de transformadores de corrente e o conceito do Filtro DS
- No capítulo 03 é descrita a modelagem do sistema de transmissão, a criação automatizada do banco de dados e a simulação das faltas. O sistema proposto consiste

em uma linha de transmissão, entre dois equivalentes de Thevenin, que representam grandes áreas com o suprimento de energia;

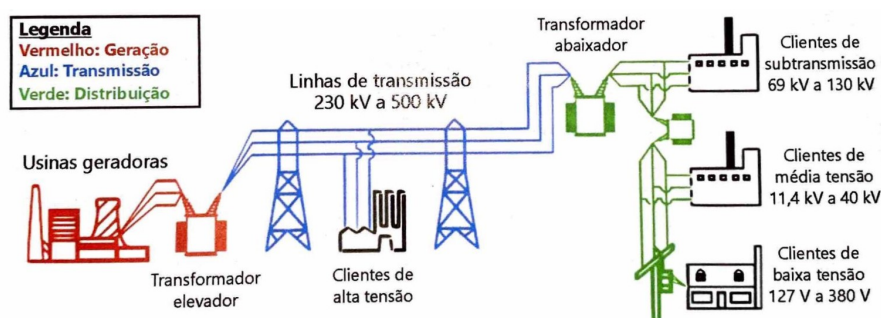
- No capítulo 04, a conclusão é apresentada, expondo os resultados obtidos por meio da análise comparativa entre sistema base e sistema com TC, além da acurácia da técnica com Filtro DS.

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Apresentação do Sistema Elétrico Brasileiro

O Sistema Elétrico de Potência é uma ferramenta de conversão e transporte de energia formado por três segmentos principais: unidades geradoras, linhas de transmissão e sistemas de distribuição, conforme apresentado na Figura 1 (GRAINGER; STEVENSON, 1994). O propósito desse sistema é prover energia elétrica com qualidade e atender à demanda de grandes e pequenos consumidores no momento em que é requisitada. Ademais, o SEP tem como requisitos básicos a disponibilidade ininterrupta do serviço, a capacidade de se adaptar a novas topologias, a segurança e a manutenção do sistema, garantindo uma rápida restauração do fornecimento em caso de falha (VASCONCELOS, 2017).

**Figura 1** – Representação do Sistema Elétrico de Potência.



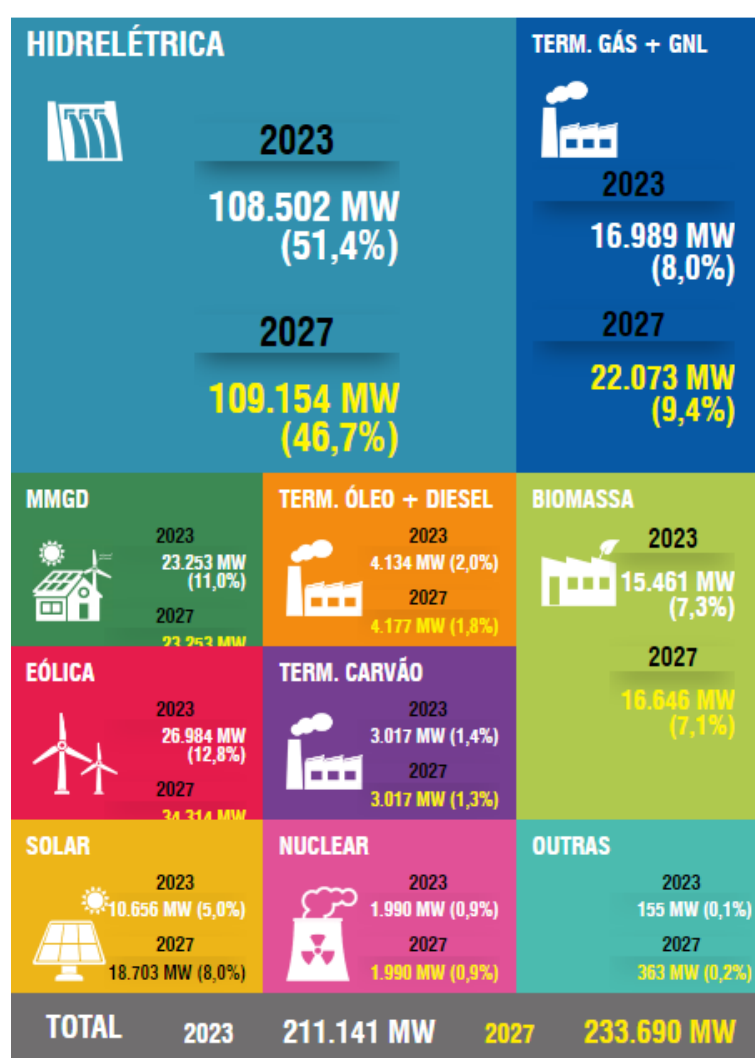
Fonte: Barros (2023)

O sistema elétrico brasileiro, denominado SIN, corresponde à produção e transmissão de energia elétrica, com predominância de geração hidroelétrica, acompanhada pelas gerações termoelétrica e eólica, com múltiplos proprietários. Quatro sub-sistemas

compõem o SIN: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. O SIN se destaca por seu tamanho, porte e interconexão entre toda a malha por meio de linhas de transmissão, o que possibilita o suprimento das diversas regiões por diferentes bacias hidrográficas, de forma a reduzir os efeitos de mudanças climáticas e fatores locais no fornecimento de energia elétrica que, por sua vez, apresenta maior segurança e economicidade (ROBBA et al., 2020; ONS, 2023c).

A capacidade instalada de geração de eletricidade no Brasil apresenta constante expansão, o que motiva a perspectiva de ampliação da geração. A busca por descarbonização tem motivado o crescente aumento da geração por fontes renováveis, conforme evidenciado no panorama 2023-2027 do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

**Figura 2** – Evolução da capacidade instalada no SIN - Outubro 2023/ Dezembro 2027.

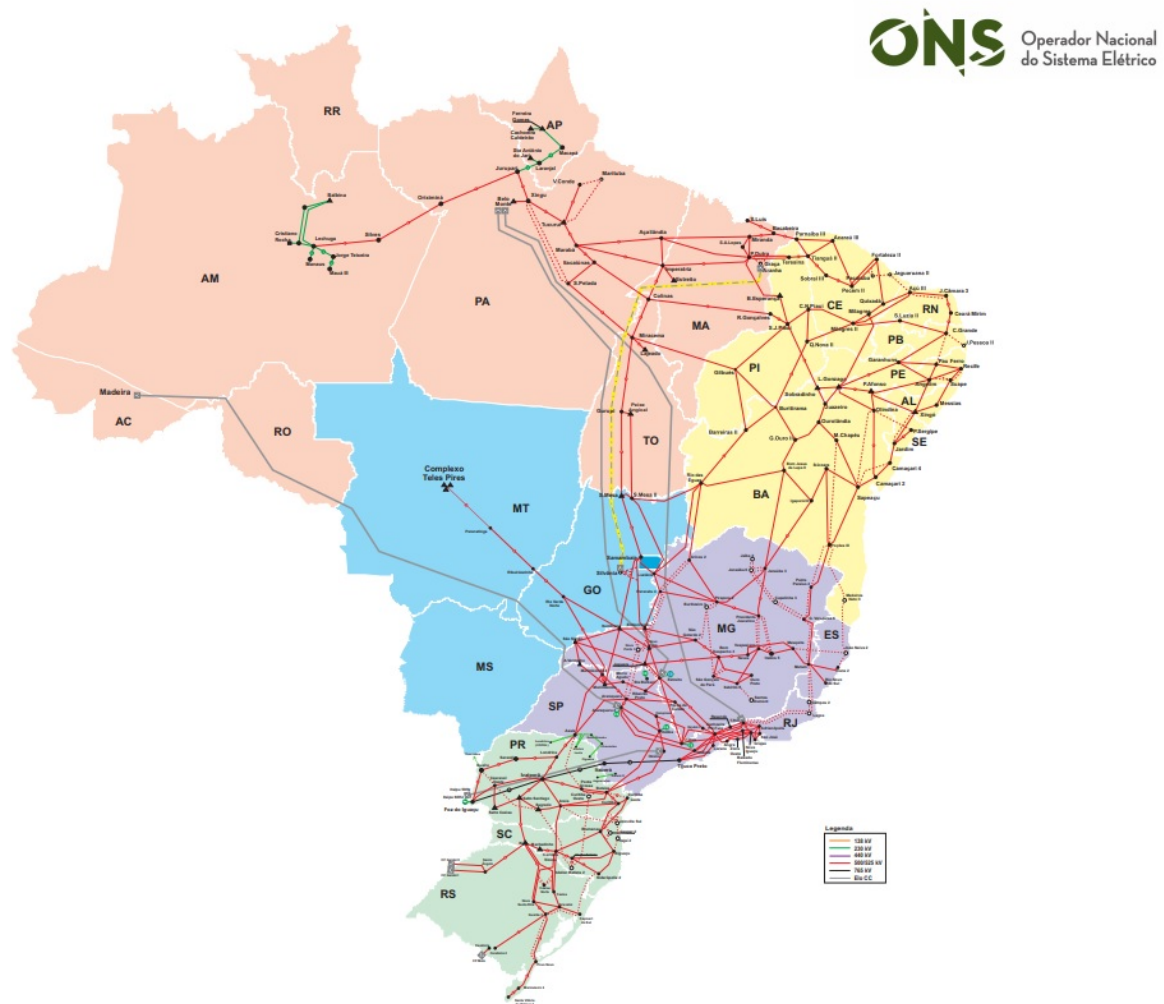


Fonte: ONS (2023d)

A fim de garantir a confiabilidade do sistema e qualidade do atendimento, a expansão do SIN acontece de forma planejada de acordo com a demanda (ONS, 2023a). Para possível visualização, é apresentado o sistema interligado brasileiro com horizonte de ex-

pansão para 2027, onde é possível ter dimensão da extensão do sistema de transmissão e os pontos de geração do SIN.

**Figura 3** – Mapa do sistema de transmissão - Horizonte 2027.



Fonte: ONS (2023b)

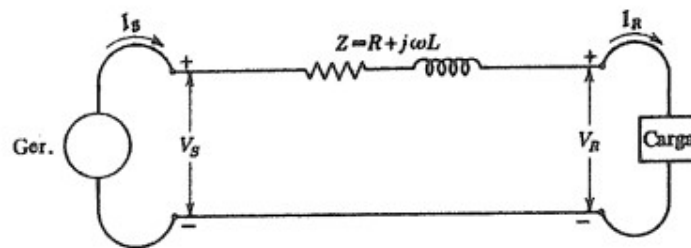
## 2.2 Modelagem de linha de transmissão

As linhas de transmissão, responsáveis pelo transporte da energia elétrica dos pontos de geração aos centros de consumo, são modeladas por equações de tensão e corrente em função de parâmetros do circuito, de acordo com o comprimento da linha. Para linhas de menores extensões, a modelagem de LT pode ser realizada a parâmetros concentrados, pois os erros relacionados são considerados aceitáveis. Para linhas com mais de 160 km, é mais apropriada a utilização de parâmetros distribuídos, que proporcionam maior precisão por se assemelhar mais à realidade (ZANETTA, 2020).

### 2.2.1 Linha de transmissão curta

Uma linha de transmissão é considerada curta se seu comprimento é de até 80 km. Linhas de transmissão curtas com até 69 kV apresentam capacitâncias pequenas, que podem ser desprezadas sem perdas consideráveis de precisão. São considerados, então, apenas a resistência e a indutância associadas em série como parâmetros concentrados para todo o comprimento da linha, a caracterizar a impedância, conforme a figura 4 (GRAINGER; STEVENSON, 1994; SAADAT, 1999).

**Figura 4** – Circuito equivalente de uma linha de transmissão curta.



Fonte: Grainger e Stevenson (1994)

onde:

$I_S$  = Corrente na barra transmissora

$I_R$  = Corrente na barra receptora

$V_S$  = Tensão fase-neutro na barra transmissora

$V_R$  = Tensão fase-neutro na barra receptora

$Z$  = Impedância da linha

As equações que modelam o circuito são provenientes da análise convencional de um circuito CA em série simples. Por não haver derivações, as correntes dos terminais transmissor e receptor são iguais.

$$I_S = I_R \quad (1)$$

Por análise nodal do circuito é determinada a tensão na barra transmissora:

$$V_S = V_R + I_R Z \quad (2)$$

As equações que descrevem o circuito podem ser expressas de forma generalizada com a utilização de constantes:

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (3)$$

$$I_S = CV_R + DI_R \quad (4)$$

Em formato matricial, temos:

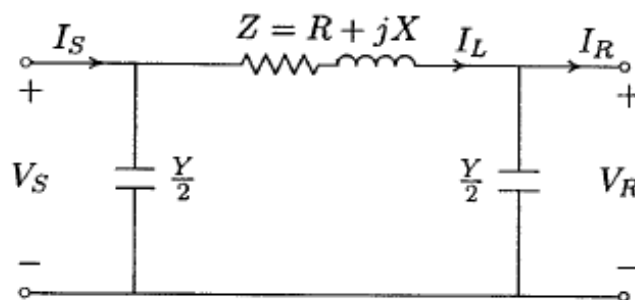
$$\begin{pmatrix} V_S \\ I_S \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_R \\ I_R \end{pmatrix}$$

Para uma linha de transmissão curta, as constantes são definidas como  $A = 1$ ;  $B = Z$ ;  $C = 0$ ;  $D = 1$ .

### 2.2.2 Linha de transmissão média

As linhas de transmissão com comprimento entre 80 km e 240 km são consideradas médias. Nessa modelagem são considerados os parâmetros concentrados de resistência e indutância em série, além da admitância em derivação, geralmente na forma de capacitância pura. A alteração na representação é devida ao aumento da corrente de carga, que acontece à medida em que há o aumento do comprimento da linha. Quando a capacitância é dividida em duas partes, representadas por duas derivações nas extremidades da linha, o circuito é chamado de  $\pi$ -nominal. Se a capacitancia for concentrada em apenas uma ramificação o circuito é denominado T-nominal (GRAINGER; STEVENSON, 1994; SAADAT, 1999).

**Figura 5** – Circuito equivalente  $\pi$ -nominal de uma linha de transmissão média.



Fonte: Saadat (1999)

Pela Lei de Kirchhoff das Correntes (LKC), podemos definir uma equação para a corrente  $I_L$ , que passa pela impedância em série com a linha.

$$I_L = I_R + \frac{Y}{2}V_R \quad (5)$$

onde:

$Y$  = Admitância em derivação por fase ao neutro por unidade de comprimento

$L$  = Comprimento da linha

Para o circuito da figura 5, pela Lei de Kirchhoff das tensões, é obtido:

$$V_s = V_R + ZI_L \quad (6)$$

Ao substituir a equação (5) em (6), temos:

$$V_s = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right)V_R + ZI_R \quad (7)$$

A corrente na derivação transmissora é dada por:

$$I_s = I_L + \frac{Y}{2}V_S \quad (8)$$

Aplicando as equações (5) e (7) em (8),  $I_S$  é expresso na forma:

$$I_S = Y\left(1 + \frac{ZY}{4}\right)V_R + \left(1 + \frac{ZY}{2}\right)I_R \quad (9)$$

De forma análoga à modelagem de linha de transmissão curta, podemos escrever a equação de forma generalizada:

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (10)$$

$$I_S = CV_R + DI_R \quad (11)$$

De forma a ter constantes com as relações  $A = D = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right)$ ;  $B = Z$ ;  $C = \left(1 + \frac{ZY}{4}\right)$ .

Na forma matricial, o seguinte quadripolo é representado:

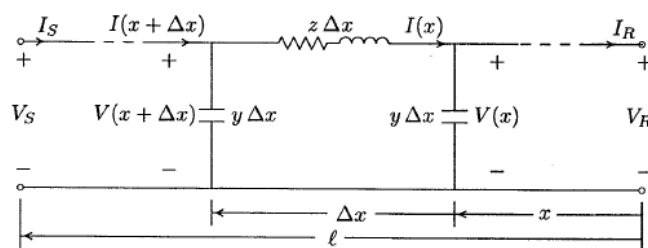
$$\begin{pmatrix} V_S \\ I_S \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_R \\ I_R \end{pmatrix}$$

Em geral, as constantes  $A, B, C$  e  $D$  são números complexos, denominados constantes generalizadas do circuito da LT. Ao haver simetria na linha, como no modelo  $\pi$ ,  $A$  será igual a  $D$ .

### 2.2.3 Linha de transmissão longa

As linhas de transmissão com mais de 240 km de comprimento são consideradas linhas longas, e requerem cálculos em termos de parâmetros distribuídos, caso seja requerido um alto grau de precisão. Em casos onde não é necessário, pode-se considerar parâmetros concentrados em linhas de até 320 km. Um modelo  $\pi$  equivalente para linhas longas é apresentado na figura 6 (GRAINGER; STEVENSON, 1994; SAADAT, 1999).

**Figura 6** – Circuito equivalente  $\pi$ -nominal de uma linha de transmissão longa com parâmetros distribuídos.



Fonte: Saadat (1999)

Ao considerar um elemento muito pequeno da linha, a distância do elemento até a barra receptora será representada por  $x$ , o comprimento do elemento será  $\Delta x$ , a impedância em série com a linha será  $z\Delta x$ , e a admitância em derivação será  $y\Delta x$ . Pela Lei de Kirchhoff das Tensões (LKT), obtemos a seguinte expressão:

$$V(x + \Delta x) = V(x) + z\Delta x I(x) \quad (12)$$

Reescrevendo, temos:

$$\frac{V(x + \Delta x) - V(x)}{\Delta x} = zI(x) \quad (13)$$

Aplicando o limite quando  $\Delta x \rightarrow 0$ , temos:

$$\frac{dV(x)}{dx} = zI(x) \quad (14)$$

Além disso, pela LKC, obtemos:

$$I(x + \Delta x) = I(x) + y\Delta x V(x + \Delta x) \quad (15)$$

Que reescrita se torna:

$$\frac{I(x + \Delta x) - I(x)}{\Delta x} = yV(x + \Delta x) \quad (16)$$

Aplicando o limite quando  $\Delta x \rightarrow 0$ , temos:

$$\frac{dI(x)}{dx} = yV(x) \quad (17)$$

Derivando a equação 14 e substituindo  $\frac{dI(x)}{dx}$  pela equação 17, obtemos:

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = z \frac{dI(x)}{dx} = zyV(x) \quad (18)$$

Definindo  $\gamma^2 = zy$ , aplicando na equação 18 e reordenando, obtemos a seguinte equação diferencial ordinária:

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} - \gamma^2V(x) = 0 \quad (19)$$

Que possui por solução genérica:

$$V(x) = A_1e^{\gamma x} + A_2e^{-\gamma x} \quad (20)$$

na qual  $\gamma$  é chamada de constante de propagação, definida pela expressão complexa:

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{zy} = \sqrt{(r + j\omega L)(g + j\omega C)} \quad (21)$$

A parte real  $\alpha$  da equação 21 é definida como constante de atenuação, e a componente  $\beta$  é a constante de fase, medida em radianos por unidade de comprimento.

Isolando  $I(x)$  na equação 14 e substituindo  $V(x)$  pela equação 20, temos:

$$I(x) = \frac{1}{z} \frac{dV(x)}{dx} = \frac{\gamma}{z} (A_1e^{\gamma x} - A_2e^{-\gamma x}) = \sqrt{\frac{y}{z}} (A_1e^{\gamma x} - A_2e^{-\gamma x}) \quad (22)$$

Se definirmos a impedância característica como  $Z_c = \frac{z}{y}$  e substituirmos na equação 22, obtemos:

$$I(x) = \frac{1}{Z_c} (A_1e^{\gamma x} - A_2e^{-\gamma x}) \quad (23)$$

Fazendo  $x = 0$  nas equações 20 e 23, podemos obter expressões para as constantes  $A_1$  e  $A_2$ .

$$A_1 = \frac{V_R + Z_c I_R}{2} \quad (24)$$

$$A_2 = \frac{V_R - Z_c I_R}{2} \quad (25)$$

Dessa forma, as expressões de corrente e tensão para uma linha de transmissão longa podem ser dadas por:

$$V(x) = \frac{V_R + Z_c I_R}{2} e^{\gamma x} + \frac{V_R - Z_c I_R}{2} e^{-\gamma x} \quad (26)$$

$$I(x) = \frac{\frac{V_R}{Z_c} + I_R}{2} e^{\gamma x} - \frac{\frac{V_R}{Z_c} - I_R}{2} e^{-\gamma x} \quad (27)$$

## 2.3 Teoria das Ondas Viajantes

### 2.3.1 Localização de faltas no SEP

Uma falta num circuito corresponde a qualquer falha que interfere no fluxo normal de corrente, e pode ser causada por fatores climáticos, como tempestades e descargas elétricas, mas também por animais, árvores ou outros fatores externos (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2010; GRAINGER; STEVENSON, 1994). As linhas de transmissão apresentam alta vulnerabilidade às faltas no SEP, devido à sua grande extensão, principalmente em Sistemas Interligados. Estas, sofrem com faltas de caráter permanente e temporário.

- **Faltas temporárias:** Correspondem à maior parte das ocorrências em linhas aéreas. São vantajosas por serem eliminadas automaticamente, o que minimiza o impacto à continuidade do fornecimento. Entretanto, também dificulta a identificação do local da falta para atuação de melhorias em pontos fracos da linha.
- **Faltas permanentes:** Causam maior impacto à continuidade na operação, devido permitir a atuação de dispositivos de proteção, sendo de localização mais fácil por se conhecer a zona em que ocorreu a falta. Entretanto, o fornecimento só poderá ser reestabelecido após a identificação e correção do ponto de ocorrência na linha.

Ao conhecer o local da falta, é possível que reparos e ações preventivas sejam efetivadas, a fim de evitar a recorrência e maiores danos à rede. Contudo, métodos como a inspeção física dos circuitos podem demandar demasiado tempo e não apresentar grande

precisão, o que resulta em baixa efetividade e eficiência. Dessa forma, ao objetivar a alta qualidade do fornecimento de energia elétrica, a busca por equipamentos que proporcionem localizações de faltas de forma precisa e eficiente se torna de extrema importância (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2010; GRAINGER; STEVENSON, 1994).

A identificação do local de falta por localizadores digitais, suplementares à proteção, pode ser realizada por implementação de uma função de formas distintas, como em:

- Relés de proteção microprocessados
- Registradores digitais de faltas
- Localizadores de faltas independentes
- Programas de análise pós falta

### 2.3.2 Métodos de identificação de faltas

Apesar das diversas técnicas existentes, a localização de faltas automática ainda é a mais utilizada. Nesse grupo de métodos, a falta é localizada por meio da análise de dados característicos, em valores e formas de onda, de tensão e corrente, considerando os parâmetros da linha. Segundo Saha, Izykowski e Rosolowski (2010), os métodos de localização automática de faltas podem ser classificados em quatro categorias, que são abordadas abaixo.

**Técnica baseada em frequência fundamental ou em impedância:** Utiliza fasores de tensão e corrente na frequência fundamental para cálculo da impedância aparente entre o ponto de falta e o local de medição. É realizada, então, a comparação entre a impedância aparente e a impedância da linha por unidade de comprimento, a partir da qual é estimada a localização da falta (LIMA, 2013). Essa técnica pode apresentar variações, de forma a haver possibilidade de utilização de medições completas, com informações de tensão e corrente, ou incompletas, com informações de apenas uma variável, sendo tensão ou corrente. Além disso, podem ser utilizadas medições de uma ou de ambas as extremidades ou terminais da linha, sendo necessário um meio de comunicação para o segundo caso. Para a aplicação unilateral, o custo de aplicação é baixo, devido a possibilidade de aplicação em relés de proteção digitais ou em registradores digitais de faltas, entretanto a alta precisão é comprometida pela falta de informações. Para a aplicação bilateral ou de mais terminais, onde é necessária a comunicação para envio de dados, a precisão é aprimorada. Atualmente, a técnica baseada em frequência fundamental ou em impedância ainda é a mais utilizada (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2010).

**Técnica baseada em componentes de alta frequência:** Utiliza componentes de alta frequência provenientes de faltas na LT, que percorrem a linha do ponto da falta até os terminais de linha. Não é amplamente utilizada (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2010).

**Abordagem baseada em inteligência:** Na identificação de faltas em linhas de transmissão de energia, técnicas de inteligência desempenham um papel crucial. Isso envolve o uso de métodos como processamento de sinais, aprendizado de máquina, sensores inteligentes, sistemas de visão computacional e integração de dados para monitorar e analisar a condição das linhas. Além disso, a fusão de dados provenientes de diversas fontes permite uma detecção mais precisa e rápida de falhas, contribuindo para a segurança e confiabilidade dos sistemas elétricos (LOPES; KÜSEL; SILVA, 2016).

**Técnica baseada em Ondas Viajantes:** Esta técnica considera dados característicos das ondas de tensão e corrente, que viajam à velocidade da luz desde o ponto de falta até os terminais da linha. Apresentam alta precisão e alto custo, pois requer alta frequência de amostragem (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2010). Esta técnica será abordada com mais detalhes posteriormente.

Dentre estas, será destacada a técnica baseada em Ondas viajantes, que tem se popularizado nas últimas décadas.

### 2.3.3 Teoria das Ondas Viajantes

Ao modelar a linha de transmissão por parâmetros distribuídos, obtivemos como solução da equação diferencial para tensão a equação 19, que tem por solução genérica a equação 20, expressa abaixo.

$$V(x) = A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x}$$

Para os fins requeridos na identificação de faltas por ondas viajantes, podemos considerar a linha sem perdas, logo, a resistência pode ser tida como nula ( $r = 0$ ). A constante de propagação dada na equação 21 é  $\gamma = \alpha + j\beta$ . Considerando essa relação, e transformando a equação 20 do domínio fasorial para o domínio do tempo, a tensão instantânea em função de  $t$  se torna:

$$V(x, t) = \sqrt{2} \Re A_1 e^{\alpha x} e^{j(\omega t + \beta x)} + \sqrt{2} \Re A_2 e^{-\alpha x} e^{j(\omega t + \beta x)} \quad (28)$$

Com o aumento de  $x$ , e conseqüente afastamento da extremidade receptora, a primeira parcela da expressão aumenta, representando uma onda que se propaga no sentido positivo de  $x$ , chamada de onda progressiva ( $V_1$ ). Em contrapartida, a segunda parcela diminui,

representando uma onda que se propaga no sentido negativo de  $x$ , denominada onda regressiva ( $V_2$ ). A sobreposição das duas componentes resulta na tensão total (ZANETTA, 2020; SAADAT, 1999).

$$V(t, x) = V_1(t, x) + V_2(t, x) \quad (29)$$

Na ocorrência de uma falta na LT, transitórios de corrente e tensão, provenientes da incidência, se propagam como ondas eletromagnéticas na LT, de forma a haver um intervalo de tempo entre o momento de ocorrência da perturbação e o instante em que a informação chega até os terminais. Há a divisão dos transitórios em duas partes no ponto de ocorrência, e a propagação acontece com uma metade do sinal para cada terminal da linha - devido à simetria da linha - em alta frequência, a uma velocidade próxima à velocidade da luz ( $\approx 300000$  km/s), conforme equacionado a seguir. Essas ondas são popularmente conhecidas como ondas viajantes (ZANETTA, 2020; SAHA; IZYKOWSKI; ROSOŁOWSKI, 2010). A velocidade de propagação é dada por:

$$v = \frac{1}{LC} \quad (30)$$

Para um condutor sem perdas com parâmetros distribuídos, considerando a linha com comprimento infinito, com raio  $r$  e altura  $h$  do solo, considerando a permeabilidade magnética ( $\mu$ ) e a permissividade do ar iguais às do vácuo ( $\epsilon$ ), a indutância é dada por

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \ln \frac{2h}{r} \quad (31)$$

e a capacitância é dada por

$$C = \frac{\pi \epsilon_0}{\ln \frac{2h}{r}} \quad (32)$$

Substituindo as equações 31 e 32 em 30, obtemos

$$v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \approx 300000 \text{ km/s} \quad (33)$$

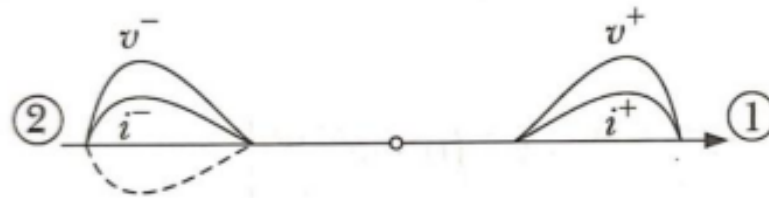
A impedância característica, ou impedância de surto, será:

$$Z = \frac{L}{C} \quad (34)$$

Ao haver a ocorrência de uma falta, como a incidência de uma descarga atmosférica, a onda se dividirá com a mesma relação de tensão e corrente, dada pela impedância  $Z$ ,

seguindo conforme os traços contínuos da figura 7. Adotando a medida de corrente positiva no sentido positivo de  $x$ , a medida da corrente que flui para o lado negativo apresentará sinal oposto, conforme a linha pontilhada (ZANETTA, 2020).

**Figura 7** – Propagação da falta em LT.



Fonte: Zanetta (2020)

A crista da onda de falta varia. Em casos em que a falta é causada por descargas atmosféricas, esta característica dependerá da intensidade do raio. A oscilação dos transientes na LT acontecerá até que o sistema alcance o regime estacionário pós-falta (GRAINGER; STEVENSON, 1994; SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2010).

Estudada a décadas com o objetivo de localizar pontos de incidência de faltas em linhas de transmissão, a TOV, relatada desde 1931, apresenta considerável precisão e é uma alternativa à técnica baseada em impedância. Para a obtenção da localização do ponto de ocorrência, é realizada a análise sucessiva das ondas viajantes provenientes da falta, com maior interesse no primeiro período e em alguns posteriores. Fenômenos como oscilação de potência, saturação de TCs não interferem na eficácia do método. Além disso, a técnica é insensível ao tipo e à resistência de falta, ao ângulo de início da falta e a parâmetros de fonte do sistema (SAHA; IZYKOWSKI; ROSOLOWSKI, 2010; LOPES; KÜSEL; SILVA, 2016).

### 2.3.4 Métodos de Ondas Viajantes para localização de faltas

De acordo com Gale et al. (1993) e Krzysztof (2011), os métodos de Ondas Viajantes podem ser classificados em tipo A, B, C, D ou E, de acordo com seu modo de operação. Os tipos A e D utilizam as ondas transitórias provenientes da falta para a identificação do ponto de ocorrência, enquanto os tipos B e C empregam geradores de pulsos para produzir os transientes. Entretanto, os métodos B e C já se encontram obsoletos, se considerados os localizadores de falta por Ondas Viajantes mais modernos. A seguir são destacados os métodos utilizados atualmente.

- **Tipo A:** Utiliza a onda transitória capturada por apenas um terminal, e necessita de pontos de descontinuidade na LT que reflitam grande parte do sinal novamente

para o ponto de ocorrência da falta. A localização da falta é obtida por meio da medição do tempo entre o instante em que o transitório da falta e o instante em que a onda refletida no local da falta chegam ao localizador, considerando também a velocidade de propagação. O método tipo A apresenta erros de precisão relacionados à correta identificação da onda, da resistência da falta e da duração de seu arco, que são resolvidos no método tipo D.

$$D = \frac{T_3 - T_1}{2}v \quad (35)$$

$D$  = Distância do localizador até o ponto de falta (m)

$T_1$  = Instante em que a primeira onda gerada no local da falta chega ao localizador (s)

$T_3$  = Instante em que a onda refletida no local da falta chega ao localizador (s)

$v$  = Velocidade da onda (m/s)

- **Tipo D:** Utiliza dois terminais da linha em suas extremidades, onde os localizadores realizam as medições mediante a detecção das duas parcelas da onda proveniente da falta. Para tanto, é necessária a sincronização dos dispositivos de localização por meio de um sistema de GPS.

$$DA = \frac{L + (T_1A - T_1B)}{2}v \quad (36)$$

$$DB = \frac{L + (T_1B - T_1A)}{2}v \quad (37)$$

$L$  = Comprimento da linha (m)

$DA$  = Distância do terminal A até o ponto de falta (m)

$DB$  = Distância do terminal B até o ponto de falta (m)

$T_1A$  = Instante em que a primeira onda gerada no local da falta chega ao terminal A (s)

$T_1B$  = Instante em que a primeira onda gerada no local da falta chega ao terminal B (s)

$v$  = Velocidade da onda (m/s)

- **Tipo E:** Com a análise em apenas um terminal, o método do tipo E utiliza o sinal gerado pelo fechamento do disjuntor na linha. A estimativa do local é realizada por meio da medição do instante em que a primeira onda é captada pelo localizador, e do instante em que a onda refletida retorna a esse ponto de medição. Essa aplicação pode ser aplicada na identificação e localização de condutores partidos.

## 2.4 Proteção do SEP

No Sistema Elétrico de Potência, distúrbios podem ocorrer, ocasionando interrupções no fornecimento de energia e redução da qualidade do serviço oferecido. Um dos principais distúrbios é o curto-circuito, que causa uma elevação na corrente, capaz de danificar equipamentos e causar danos irreparáveis ao sistema e aos consumidores finais. A fim de minimizar os prejuízos, são acoplados sistemas de proteção à rede, que buscam identificar e atuar de forma assertiva para o isolamento do ponto de falta. Por meio de equipamentos como disjuntores, fusíveis e chaves seccionadoras, parte do circuito é desconectada da rede. Os dispositivos de proteção também são responsáveis pela captação de informações das faltas, que poderão ser úteis na localização do ponto de falta, no dimensionamento do distúrbio ocorrido e na detecção de pontos de melhoria, a partir da identificação dos agentes causadores dos defeitos. Os dispositivos básicos aplicados a proteção do SEP são os fúsiveis, que operam pela fusão de seu elo metálico a partir de características de tempo e corrente, e os relés, que podem atuar por uma ou mais características técnicas (FILHO; MAMEDE, 2020).

### 2.4.1 Relés

Os relés, em sua variada gama de funções, podem realizar a proteção do SEP em ocorrência de sobrecargas, curto-circuitos, sobretensões, subtensões, entre outras anormalidades da linha, a depender das características técnicas definidas à sua operação (FILHO; MAMEDE, 2020). De acordo com Caminha (1977), a proteção por meio de relés tem duas funções:

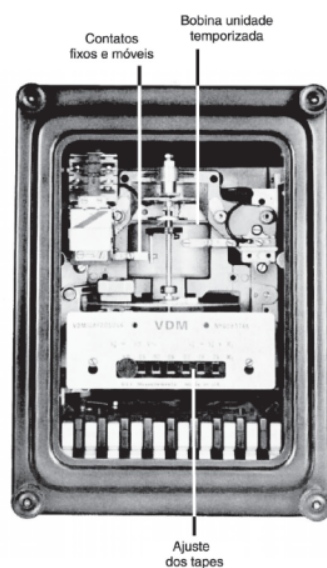
- **Função principal**, de retirar de linha partes do circuito com curto-circuito ou equipamentos com operação anormal. Nestes casos, o relé permite a atuação do disjuntor, que desenergiza as seções afetadas. Por meio de manobras, é possível que as cargas conectadas às linhas desativadas sejam alimentadas por outras partes do circuito;
- **Função secundária**, de identificar o local da falta e o tipo de defeito, a fim de facilitar a correção e o reestabelecimento do fornecimento, além de orientar futuras manutenções necessárias.

Os relés evoluíram ao longo do tempo, recebendo novas funções e aprimorando as já existentes. A seguir são apresentados os tipos de relés e o seu aperfeiçoamento.

- **Relés eletromecânicos:** Os primeiros relés a entrarem em uso foram os eletromecânicos de indução, de fácil manutenção e ajuste de parâmetros elétricos. São

robustos e obsoletos na atualidade, tendo sua fabricação descontinuada. Entretanto, ainda é possível encontrá-los em diversas subestações de concessionárias de energia elétrica, fábricas, prédios comerciais, entre outros. Ainda assim, são amplamente utilizados de forma didática, por facilitar o entendimento da compreensão de relés digitais.

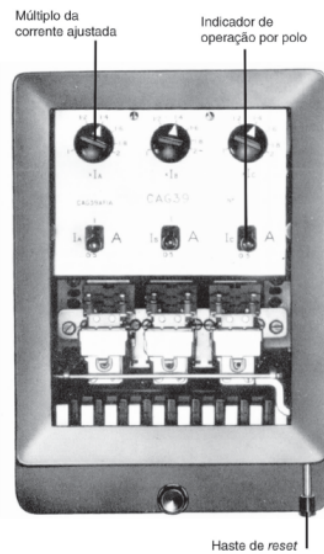
**Figura 8** – Relé de sobrecorrente do tipo indução.



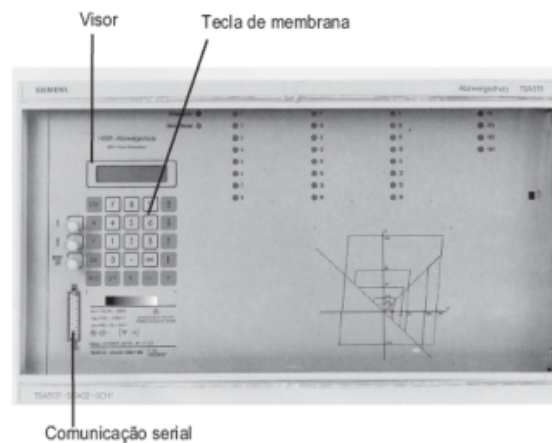
Fonte: Filho e Mamede (2020)

- **Relés eletrônicos ou estáticos:** Com dimensões reduzidas em relação aos relés eletromecânicos, e reproduzem suas peças mecânicas em circuitos impressos. Devido ao pequeno avanço, tais relés já estão em obsolescência. Cada função desempenhada é destinada a um circuito integrado, com elevada velocidade de operação e alta precisão.
- **Relés digitais:** Providos de *chips* com alta velocidade de processamento, baseada em microprocessadores, os relés digitais são amplamente utilizados na atualidade, munidos de programas que processam as informações obtidas pelos transformadores de potencial e de corrente. Além da proteção, os relés digitais realizam funções de comunicação, medidas elétricas, controle, permitem acesso remoto, entre outros.

Os sinais de entrada, como corrente, tensão e frequência, são recebidos de forma analógica, e posteriormente convertidos em digitais por conversores A/D. Ao contrário dos seus antecessores, o relé digital apresenta o diagnóstico de falha por meio do armazenamento de dados, pois são dotados de memória.

**Figura 9** – Relé eletrônico.

Fonte: Filho e Mamede (2020)

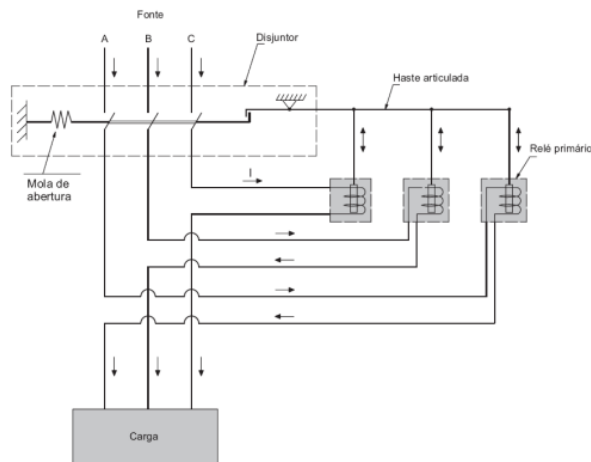
**Figura 10** – Relé digital.

Fonte: Filho e Mamede (2020)

#### 2.4.1.1 Formas de acionamento dos relés

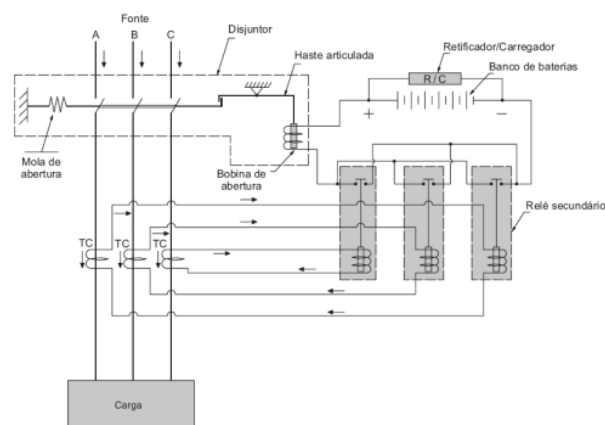
Os relés podem acionar os equipamentos de interrupção por dois modos, sendo eles primário ou secundário. Os **relés primários** são de atuação direta, comumente não necessitam de transformadores redutores e são aplicados a pequenas e médias instalações industriais. Em alguns casos, os equipamentos redutores são mantidos, entretanto a característica básica de acionamento direto do disjuntor por mecanismo próprio é conservado, conforme esquemático da figura 11, que ilustra a ligação de um relé primário para proteção de sobrecorrente, sem transformadores redutores (FILHO; MAMEDE, 2020).

Já os **relés secundários** são aplicados em instalações de médio e grande porte, sendo de ação indireta. Além de necessitarem de transformadores redutores, requerem

**Figura 11** – Esquemático relé primário.

Fonte: Filho e Mamede (2020)

também fontes auxiliares, que podem ser de corrente contínua ou alternada. Em sua maioria apresentam maior confiabilidade, com ajustes mais precisos e curvas de temporização mais bem delimitadas. Este tipo de relé atua indiretamente sobre os disjuntores, ao permitir o fechamento dos contatos dos circuitos da bobina do disjuntor, ligados à fonte auxiliar. A figura 12 ilustra o esquema de ligação de um relé secundário com contatos ligados em paralelo, que, mediante um defeito em qualquer uma das fases, a bobina de abertura do disjuntor é energizada por um banco de baterias (FILHO; MAMEDE, 2020).

**Figura 12** – Esquemático relé secundário com contatos em paralelo.

Fonte: Filho e Mamede (2020)

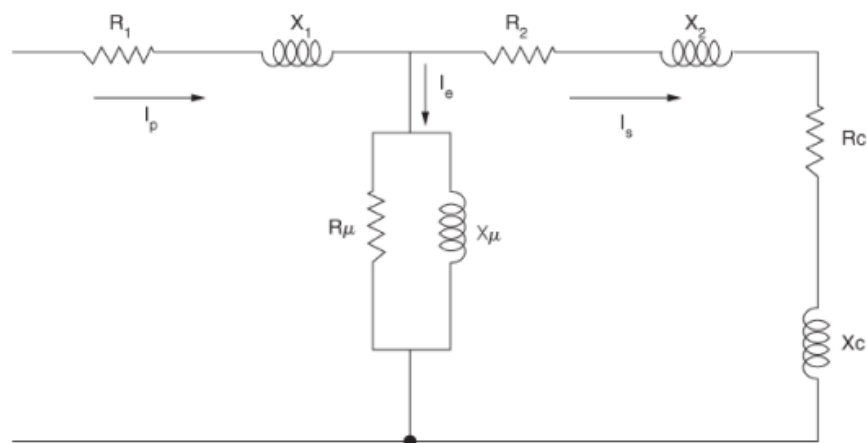
## 2.4.2 Transformadores de Corrente

Os transformadores de medida do SEP permitem o funcionamento de instrumentos de medição e proteção, como relés e medidores de energia, em medidas elétricas distintas e menores que os parâmetros do circuito principal.

Com base na definição estabelecida pela norma IEC 61869-2, um transformador de corrente (TC) "é um instrumento que, em condições normais de operação, possui no seu secundário uma corrente proporcional a do primário e com um ângulo de defasagem aproximadamente nulo, para uma conexão correta"(IEC, 2012). Os Transformadores de Corrente, em geral, possuem um primário com poucas espiras, e um secundário, costuma ter corrente nominal igual a 5A, mas que pode ser 1A se o dispositivo de proteção (normalmente o relé) for instalado distante do TC, dessa forma é reduzida a queda de tensão nos fios de interligação. A baixa corrente de secundário permite que os dispositivos de medição e proteção sejam dimensionados em tamanhos reduzidos (FILHO; MAMEDE, 2020).

Alteração nos valores de correntes acontece mediante uma relação de transformação proveniente do fenômeno de conversão eletromagnética. A corrente que flui nos enrolamentos primários gera o fluxo magnético alternado, que induz as forças eletromotrizes nos enrolamentos primários e secundários. A figura 13 ilustra o esquema de representação de um TC. (FILHO; MAMEDE, 2020)

**Figura 13** – Esquemático do Transformador de Corrente.



Fonte: Filho e Mamede (2020)

onde:

$R_1$ : Resistência primária

$X_1$ : Reatância primária

$R_2$ : Resistência secundária

$X_2$ : Reatância secundária

$R_\mu$ : Resistência do ramo magnetizante

$X_\mu$ : Reatância do ramo magnetizante

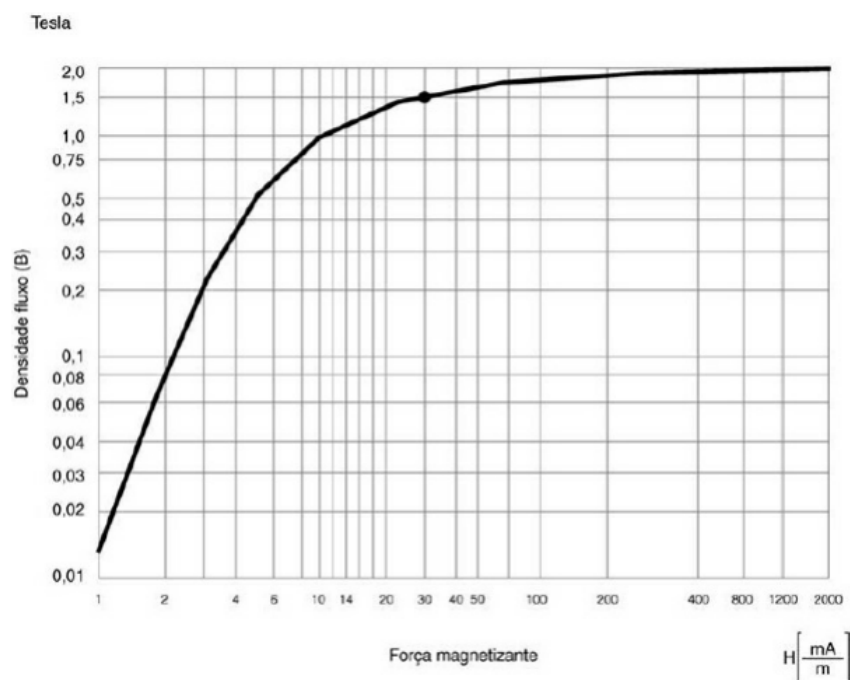
O ramo magnetizante é composto pela resistência, que representa as perdas ôhmicas por meio das correntes de Histerese e de Foucault, e que são derivadas da passagem de

linhas de fluxo magnético no núcleo de ferro. Além disso, há a reatância, responsável pela corrente reativa gerada pelas mesmas linhas de fluxo magnético. A corrente que circula pelo ramo magnetizante é a responsável pelo erro de medida do TC, enquanto a impedância do primário é apenas acrescida à impedância do circuito de alimentação, de forma a não interferir na exatidão do transformador. De acordo com a figura 13, considerando uma relação 1:1, se não houvessem perdas ou erros no TC, as correntes  $I_p$  e  $I_s$  assumiriam o mesmo valor. Entretanto, o que temos é a relação  $I_p = I_e + I_s$  (FILHO; MAMEDE, 2020).

#### 2.4.2.1 Corrente de magnetização e saturação do TC

A corrente de magnetização de TCs é fornecida pelos fabricantes e permite que seja calculada a tensão induzida no secundário, bem como a corrente magnetizante entre outros fatores. De forma complementar, a corrente de magnetização varia de acordo com o TC devido à característica de não linearidade magnética dos materiais de seu núcleo, aumentando conforme uma curva logartímica.

**Figura 14** – Curva de magnetização de um transformador de corrente.



Fonte: Filho e Mamede (2020)

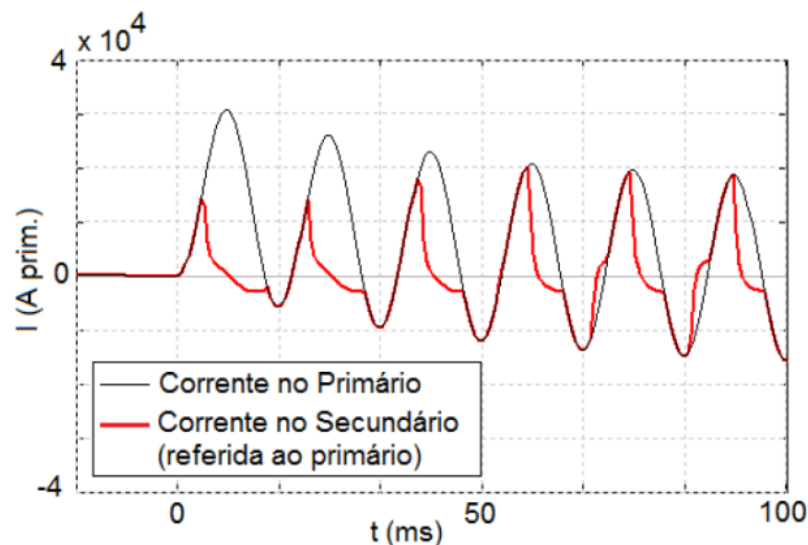
A curva de magnetização de um transformador é dada pela força magnetizante *vs* densidade de fluxo, conforme exemplo da figura 14. Acima do ponto de joelho da curva de magnetização, a corrente de excitação extraída pelo núcleo aumenta muito mais rapidamente do que abaixo do ponto de joelho. Assim, o erro de razão dos TCs rapidamente

se torna mais crítico. Essa característica define a saturação do TC, que pode causar mau funcionamento dos relés de proteção. (FILHO; MAMEDE, 2020; POWELL, 1979).

A NBR 6856 determina que, para equipamentos de proteção, o fator de sobre-corrente deve ser 20 vezes a corrente nominal. Já TCs de medição apresentam esse fator 4 vezes maior que a corrente nominal. A partir desses valores, o TC atua em saturação. Os TCs de proteção devem ser capazes de transformar elevadas correntes de curto-circuito em pequenas correntes para a atuação de relés, possuindo, dessa forma, corrente de saturação em valor elevado (FILHO; MAMEDE, 2020).

Em casos de curto-circuito, a corrente e a carga no secundário do transformador de corrente (TC) podem exceder os valores projetados, levando o núcleo à saturação e distorcendo a corrente secundária em relação à primária. Essa distorção, agravada pela componente de corrente contínua do curto-circuito assimétrico, pode resultar em falhas na proteção, como atuação incorreta, atraso ou até o não-acionamento do relé (TRENTO, 2015).

**Figura 15** – Forma de onda da corrente do primário em relação ao secundário de um TC quando há saturação.



Fonte: Trento (2015)

#### 2.4.2.2 Erros dos transformadores de corrente

Os TCs utilizados para medição possuem alta permeabilidade magnética, permitindo operar com uma densidade de fluxo magnético em torno de 0,1 T e entrando em saturação a partir de 0,4 T. Essa alta permeabilidade visa minimizar a corrente de desmagnetização, que é um dos principais fatores responsáveis pelos erros de medição nos TCs. Já os TCs utilizados para proteção possuem um núcleo de menor permeabilidade

em comparação aos TCs de medição, permitindo que a saturação ocorra apenas em densidades de fluxo magnético mais elevadas. Essa característica garante um desempenho adequado em condições de falha, evitando distorções na reprodução da corrente primária durante curtos-circuitos.

Os TCs possuem uma relação de transformação nominal e real. A relação nominal é especificada pelo fabricante e define a proporção entre as correntes primária e secundária para a qual o TC foi projetado. Já a relação real é obtida por meio de medições laboratoriais e apresenta pequenas variações devido às características do material ferromagnético do núcleo. Nos TCs de medição, a precisão da corrente medida depende principalmente do erro na relação de transformação. No entanto, em medições que envolvem o ângulo entre corrente e tensão, é essencial considerar o erro de fase introduzido pelo TC. Esse erro pode comprometer cálculos como o do fator de potência, caso a corrente secundária apresente um avanço ou atraso em relação à tensão. Os erros de relação e de fase variam conforme a corrente primária, a carga no secundário e, em menor grau, a frequência do sistema, que geralmente é considerada constante nas redes elétrica (FILHO; MAMEDE, 2020).

## 2.5 Filtro *Differentiator-Smoother* (DS)

O Filtro DS (*Differentiator-Smoother*) é um filtro digital amplamente estudado e aplicado em sistemas de proteção e localização de faltas em linhas de transmissão. Sua principal função é atuar como um diferenciador suavizado, permitindo a extração das componentes transitórias das ondas viajantes geradas durante a ocorrência de faltas elétricas. Segundo Schweitzer et al. (2014), esse filtro é especialmente útil em algoritmos de proteção rápida, pois melhora a detecção das frentes de onda associadas às faltas sem amplificar ruídos de alta frequência que poderiam comprometer a análise.

O fenômeno de propagação das ondas viajantes em linhas de transmissão apresenta caráter transitório, ou seja, as frentes de onda induzidas por faltas contêm componentes de alta frequência que se propagam rapidamente ao longo da linha. No entanto, os sinais medidos nos terminais da linha contêm também componentes de baixa frequência, associadas ao regime permanente do sistema elétrico, que podem mascarar informações essenciais para a localização da falta (Costa et al., 2010). Para superar essa limitação, o Filtro DS suaviza as variações abruptas do sinal e realça as componentes transitórias, permitindo uma melhor identificação dos instantes de chegada das ondas viajantes nos pontos de medição.

Diferente de filtros convencionais passa-altas ou passa-faixa, que apenas atenuam determinadas faixas de frequência, o Filtro DS mantém um ganho unitário, ou seja, pre-

serva a amplitude das componentes transitórias enquanto filtra as frequências indesejadas (Schweitzer et al., 2015). Isso é fundamental para que as frentes de onda sejam identificadas corretamente, garantindo maior precisão na extração das informações necessárias para a localização da falta.

A aplicação do Filtro DS na localização de faltas está diretamente relacionada à necessidade de identificar, de forma confiável, os instantes de chegada das ondas viajantes nos terminais da linha. Métodos baseados na Teoria das Ondas Viajantes utilizam a diferença de tempo entre a chegada das frentes de onda nos terminais para calcular a posição da falta. No entanto, ruídos e distorções nos sinais medidos podem dificultar essa detecção, levando a erros na estimativa da distância da falta. Estudos como os de Schweitzer et al. (2014) e Schweitzer et al. (2015) demonstram que o Filtro DS pode ser integrado a esquemas de proteção rápida no domínio do tempo, melhorando significativamente a resposta dos algoritmos de localização de faltas. Com a sua aplicação, torna-se possível reduzir o impacto de componentes indesejadas no sinal e aumentar a precisão da detecção das frentes de onda incidentes e refletidas, otimizando a estimativa da posição da falta.

Pesquisas indicam que o Filtro DS pode ser combinado com técnicas avançadas de processamento de sinais, como a Decomposição Variacional de Modos (VMD), para aprimorar ainda mais a análise das ondas viajantes e aumentar a robustez dos algoritmos de localização (Saha et al., 2010; Zimath et al., 2010). Dessa forma, a utilização desse filtro representa uma abordagem promissora para sistemas elétricos de potência, possibilitando uma localização de faltas mais rápida e precisa, essencial para minimizar tempos de interrupção e garantir maior confiabilidade no fornecimento de energia.

O uso do Filtro DS tem sido amplamente reportado na literatura como uma ferramenta eficaz para aprimorar a localização de faltas e a proteção de sistemas elétricos. Sua capacidade de realçar as frentes de onda associadas às faltas, enquanto mantém a integridade das informações transitórias, torna-o uma escolha ideal para aplicações baseadas na Teoria das Ondas Viajantes. No entanto, apesar dos avanços já registrados, o desempenho desse filtro ainda pode ser otimizado por meio da integração com novas técnicas de processamento de sinais, abrindo caminho para futuros estudos que visam aprimorar a eficiência e confiabilidade dos sistemas de proteção e monitoramento em redes de transmissão.

---

## MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

### 3.1 Modelagem e simulação do sistema de transmissão sem equipamentos de medição em *Software ATPDraw*

#### 3.1.1 Modelagem do sistema base

Para a análise dos TCs na localização de faltas, foi realizada a modelagem do sistema com e sem transformadores de corrente. O sistema de transmissão simulado sem a inserção de equipamentos de medição foi considerado como sistema base, a fim de obter parâmetros de tensão e corrente a serem comparados ao sistema com equipamentos de medição, que foi modelado e simulado a posteriori. Para o sistema, foi considerada uma linha de transmissão de 210 km conectada a dois terminais, e a estes, a conexão do equivalente de Thevenin das extremidades do sistema. A configuração da linha de transmissão, bem como da torre de transmissão possuem parâmetros expostos em Lopes et al. (2020), apresentados na Figura 16.

Conforme apresentado na Figura 17, o sistema possui duas fontes de tensão de 230 kV, com frequência de 60 Hz, conectadas por uma linha de transmissão formada por 6 elementos de linha a parâmetros distribuídos, inseridos por meio do bloco LCC do *ATPDraw*. Os comprimentos de cada bloco LCC são de 10,5 km, 52,5 km, 42 km, 42 km, 42 km e 21 km, respectivamente, que correspondem a 5%, 30%, 50%, 70% e 90% e 100%

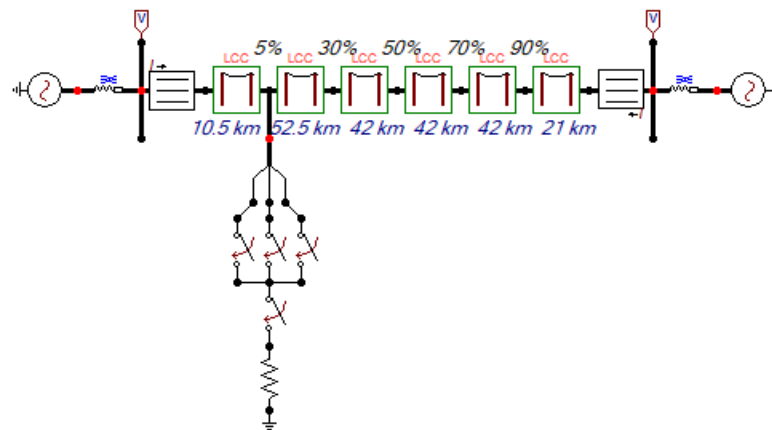
**Figura 16** – Parâmetros da torre, dados dos cabos (raio e resistências) e parâmetros da LT.



Fonte:

do comprimento total da linha.

**Figura 17** – Sistema base para o estudo da localização de faltas sem equipamentos de medição.



Fonte: Autoria própria.

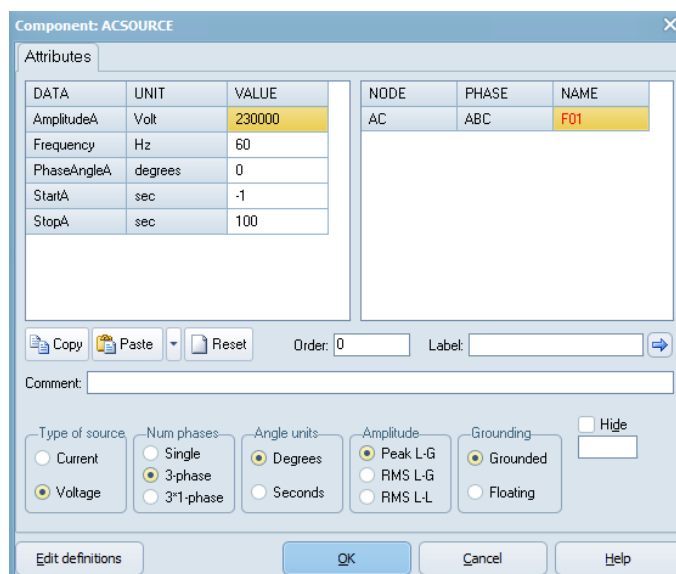
### 3.1.2 Procedimento de modelagem no ATPDraw

Nessa seção são apresentados os parâmetros de modelagem no *software ATPDraw*, a fim de detalhar a simulação e possibilitar a réplica do sistema para estudos futuros. O sistema de transmissão foi modelado por intermédio do *software ATPDraw* versão 7.4, com a utilização de um computador pessoal da marca DELL, equipado com um *hardware* composto por um processador Intel® core™ i5 (8º geração), 8,00 GB de memória RAM e um armazenamento em disco de estado sólido de 250 GB.

### 3.1.3 Fontes de tensão

As fontes de tensão trifásicas foram modeladas com a função ACSOURCE (1&3), com tensão de 230 kV e frequência de 60 Hz. O ângulo da fase A, no campo PhaseAngleA, foi definido como 0. No campo StartA, que corresponde ao tempo de início (em segundos) da fase A, foi inserido um valor negativo para incluir os sinais no estado estacionário, e o campo StopA, que indica o tempo de término do sinal na fase A (em segundos), foi definido como 100 s, sendo um valor maior que o tempo de simulação definido. Os parâmetros das fontes de tensão podem ser observados na Figura 18.

**Figura 18** – Modelagem das fontes de tensão.



Fonte: Autoria própria.

### 3.1.4 Linha e torre de transmissão

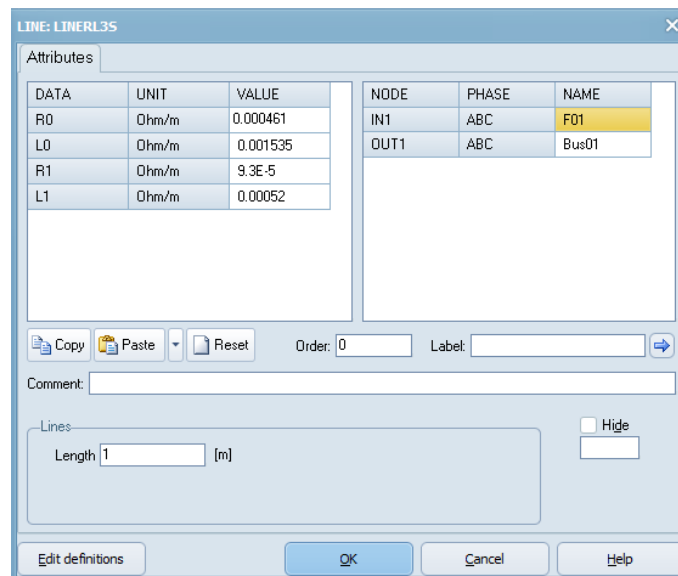
Conectadas às fontes de tensão, foram inseridas linhas RL simétricas acopladas, onde foram inseridos os valores de impedância de sequência zero ( $R_0$  e  $L_0$ ) e de sequência positiva ( $R_1$  e  $L_1$ ) da linha em suas partes reais e imaginárias, em Ohm/m, conforme Figura 19.

Para que a unidade de medida esteja em Ohm/m, é necessário que, em *<ATP/Settings>*, seja marcada a caixa de seleção "Power Frequency", e inseridos os valores de frequência (60 Hz) em "Xopt" e "Freq", conforme a Figura 20.

#### 3.1.4.1 Line Constants (LCC)

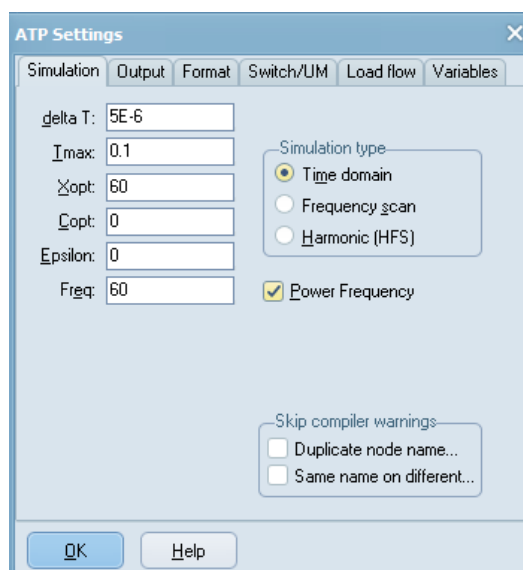
Ao considerar um sistema de transmissão aérea, as características da torre, como altura de cada segmento e distância entre os condutores, são relevantes para a análise do

Figura 19 – Modelagem da LT.



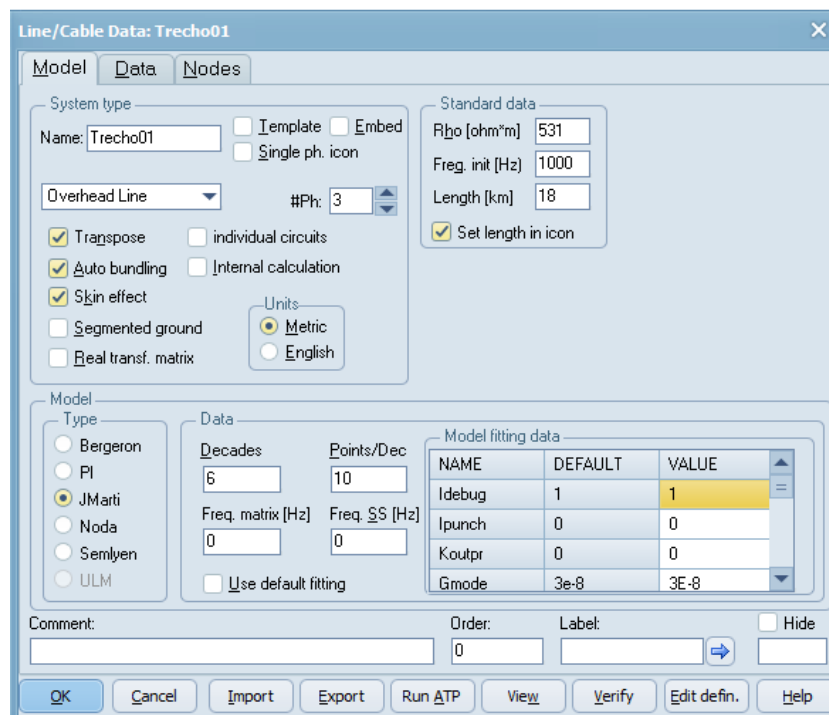
Fonte: Autoria própria.

Figura 20 – ATP Settings.



Fonte: Autoria própria.

sistema. Quando é conhecida a estrutura da torre que suporta as linhas de transmissão, são especificados os dados geométricos e materiais para a linha aérea e os dados elétricos correspondentes são calculados automaticamente pela rotina de suporte *Line Constants* (LCC). Cada bloco LCC corresponde a um trecho da linha onde as faltas serão incididas. Os dados da estrutura física e da resistência do solo da Figura 16 são aplicados, conforme a Figura 21. É considerada uma linha aérea transposta, com vários fios condutores, efeito pelicular presente e sistema modelado segundo J. Martí de parâmetros distribuídos dependente da faixa de frequência. Na primeira aba da rotina é especificada a resistência do solo e o comprimento do trecho.

**Figura 21** – Subrotina LCC.

Fonte: Autoria própria.

Os demais parâmetros são apresentados na aba "Data":

Ph.no. - Fase;

Rin - Raio interno do condutor;

Rout - Raio externo do condutor;

Resis - Resistência por unidade de km;

Horiz - Distância horizontal da torre, calculada com base no eixo que fica no centro da torre. Para as medidas á esquerda os valores serão negativos;

Vtower - Altura do condutor sobre o solo;

Vmid - Distância entre a flecha e o solo;

Separ - Distância entre condutores em um feixe;

Alpha - Posição angular entre um condutor e outro;

NB - Número de condutores em um feixe.

### 3.1.5 Elementos de medição

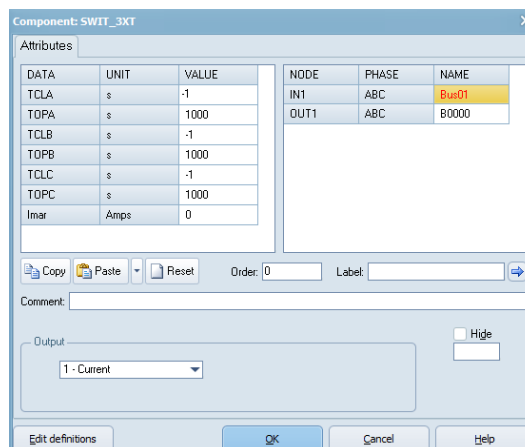
Para medição da tensão é utilizada a ponta de prova "Probe Voltage". Para medição da corrente é utilizada uma chave trifásica controlada por tempo conforme parâmetros apresentados na Figura 23. O tempo inicial da chave trifásica é -1 s, para iniciar antes do momento inicial da simulação. O tempo final é 1000 s, considerando ser um tempo

**Figura 22** – Subrotina LCC - Parâmetros.

| Line/Cable Data: Trecho01 |        |          |           |                   |           |            |          |            |             |    |
|---------------------------|--------|----------|-----------|-------------------|-----------|------------|----------|------------|-------------|----|
| Model Data Nodes          |        |          |           |                   |           |            |          |            |             |    |
| #                         | Ph.no. | Rin [cm] | Rout [cm] | Resis [ohm/km DC] | Horiz [m] | Vtower [m] | Vmid [m] | Separ [cm] | Alpha [deg] | NB |
| 1                         | 0      | 0.371    | 0.476     | 3.51              | -5.791    | 26.82      | 26.82    | 0          | 0           | 1  |
| 2                         | 0      | 0.371    | 0.476     | 3.51              | 5.791     | 26.82      | 26.82    | 0          | 0           | 1  |
| 3                         | 1      | 1.0211   | 1.25      | 0.0922            | -9.22     | 19.55      | 19.55    | 0          | 0           | 1  |
| 4                         | 2      | 1.0211   | 1.25      | 0.0922            | 0         | 19.55      | 19.55    | 0          | 0           | 1  |
| 5                         | 3      | 1.0211   | 1.25      | 0.0922            | 9.22      | 19.55      | 19.55    | 0          | 0           | 1  |

Fonte: Autoria própria.

suficientemente grande para que a chave não abra enquanto a simulação ocorrer. A seta na chave indica a referência de medição, que é importante pois equivale à referência de medição quando é inserido um transformador de corrente no sistema. Na segunda chave, próxima à Barra 2, a chave é invertida, para que as medições de corrente positivas sejam as que estão entrando na linha, como em sistemas reais.

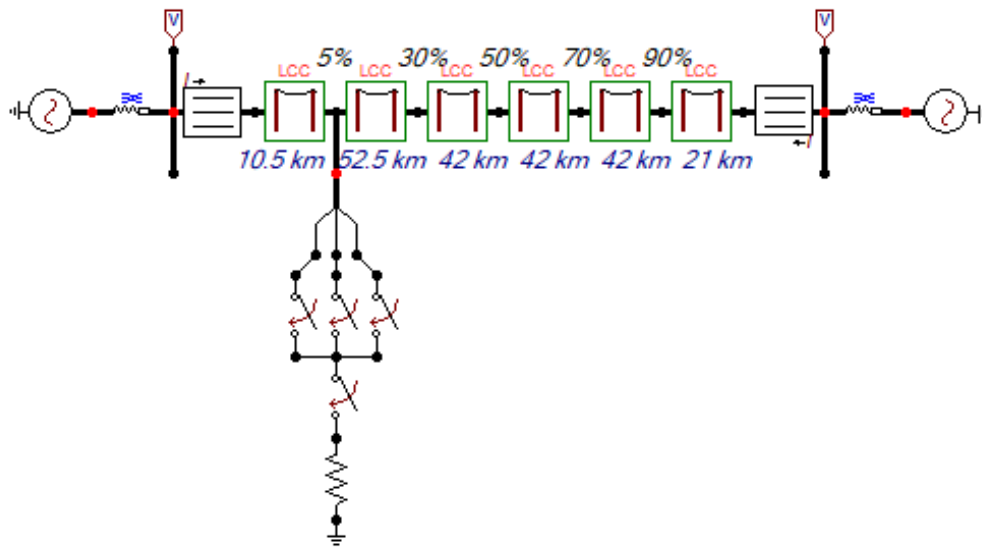
**Figura 23** – Chave trifásica controlada por tempo.

Fonte: Autoria própria.

### 3.1.6 Faltas no sistema

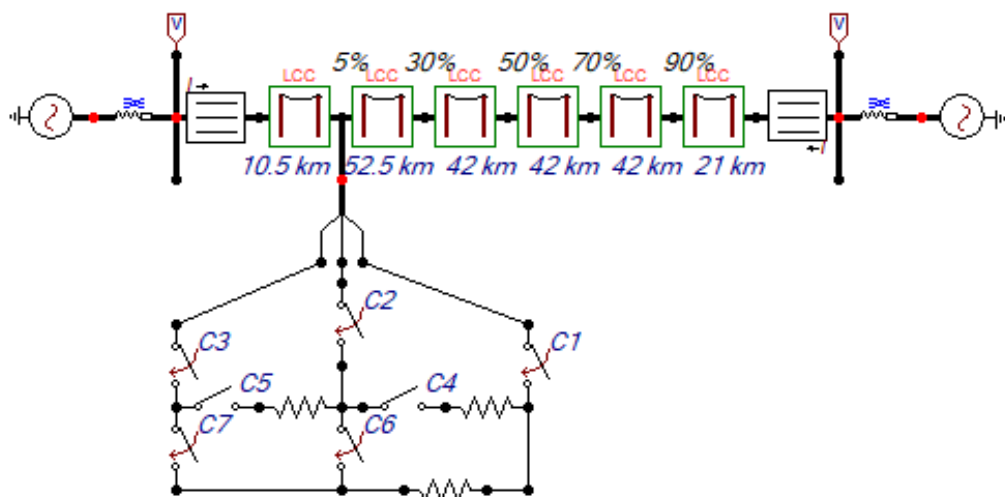
A fim de possibilitar simular todos os tipos de faltas fase-terra e fase-fase por meio de abertura e fechamento de chaves no código .atp da simulação do sistema, a modelagem do dividida em duas possibilidades: sistema com faltas envolvendo o terra e sistema com faltas sem envolvimento de terra.

Foi adicionado um componente de conexão trifásico entre dois dos blocos LCC. Em cada ramo da conexão foi adicionada uma chave onde é definido o ângulo de incidência e a duração da falta. Em série, é adicionada uma resistência correspondente à resistência da falta.

**Figura 24** – Sistema com falta envolvendo terra.

Fonte: Autoria própria.

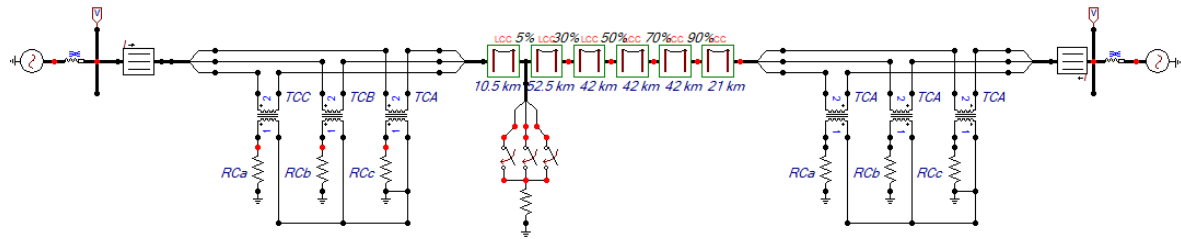
Para faltas sem o envolvimento do terra, teremos a incidência da falta mediante a combinação de abertura de chaves, conforme modelagem a seguir.

**Figura 25** – Sistema com falta sem terra.

Fonte: Autoria própria.

## 3.2 Inserção do transformador de corrente

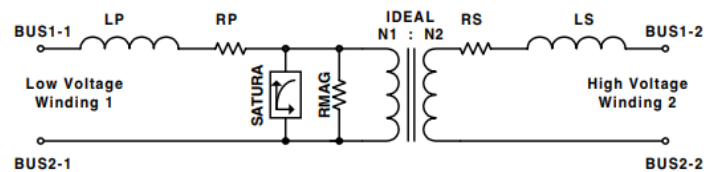
Para analisar a influência dos transformadores de corrente, foram modelados TCs com relação de 1200/5, conforme parâmetros da *Schweitzer Engineering Laboratories*. Após modelados, foram conectados ao sistema, conforme ilustra a Figura 26.

**Figura 26** – Sistema para o estudo da localização de faltas com equipamentos de medição.

Fonte: Autoria própria.

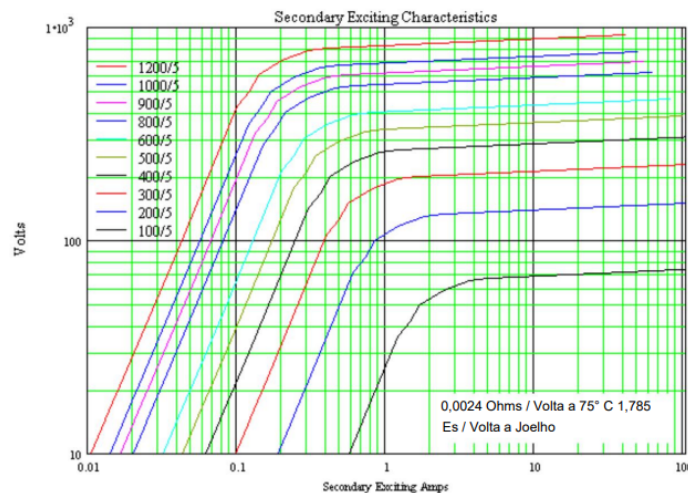
### 3.2.1 Modelagem do Transformador de Corrente Saturável em *Software ATPDraw*

Este tópico fornece o procedimento de modelagem de um Transformador de Corrente utilizando a versão Alternative Transients Program (ATP) do EMTP. O circuito equivalente de um Transformador de Corrente Saturável é apresentado na Figura 27.

**Figura 27** – Esquemático do Transformador de Corrente Saturável.

Fonte: SEL

É considerado um modelo de TC com relação de transformação 1200/5, com curva de saturação apresentada na Figura 28.

**Figura 28** – Curva característica do TC.

Fonte: SEL

Os parâmetros do secundário do TC são definidos com base nos valores da curva e de informações fornecidas. Tem-se que a resistência por espira é 0,0024 ohms. Dada a relação de transformação de 1200/5, temos 240 espiras. Calculando a resistência total do secundário  $R_s$ :

$$R_s = 0,0024 \cdot 240 = 0,576\Omega \quad (38)$$

A tensão no Joelho da curva de excitação é determinada pelo produto entre a quantidade de espiras e a tensão induzida por espira no ponto de Joelho da curva. Dessa forma, a tensão secundária no Joelho da curva de excitação é  $V_s$ :

$$V_s = 1,785 \cdot 240 = 428,4V \quad (39)$$

São selecionados um ponto na extremidade inferior da curva, vários pontos na curva e acima do Joelho, além de um ponto na extremidade superior, a fim de descrever a curva de saturação do TC. Em posse desses valores, é criado um arquivo "*SAT240.atp*" com pares de corrente-tensão RMS selecionados da curva de excitação secundária 1200/5.

```

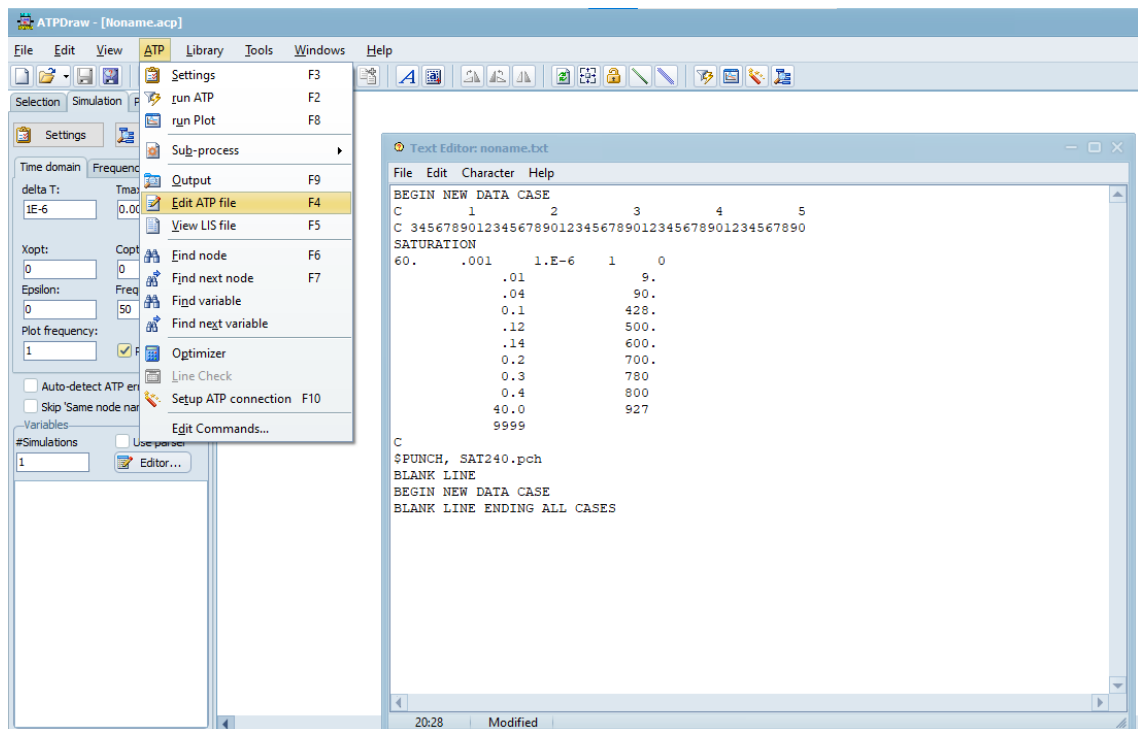
1 BEGIN NEW DATA CASE
2 C          1          2          3          4          5
3 C 345678901234567890123456789012345678901234567890
4 SATURATION
5 60.        .001        1.E-6        1        0
6           .01          9.
7           .04          90.
8           0.1          428.
9           .12          500.
10          .14          600.
11          0.2          700.
12          0.3          780
13          0.4          800
14          40.0         927
15          9999
16 C
17 $PUNCH , SAT240.pch
18 BLANK LINE
19 BEGIN NEW DATA CASE
20 BLANK LINE ENDING ALL CASES

```

Programa 1 – Código SAT.atp com pares de corrente-tensão selecionados da curva de excitação secundária 1200/5 para parâmetro do TC

O arquivo SAT.atp pode ser criado no *ATPDraw*, conforme ilustrado na Figura a seguir. Os espaçamentos devem ser respeitados, pois a posição de cada caracter é crítica. O *ATP* utiliza um sistema de leitura baseado em colunas fixas, de forma que cada linha do arquivo é lido como um conjunto de campos específicos, e a posição exata de cada valor ou parâmetro define o seu significado. É utilizada a rotina auxiliar *saturation* para transformar os valores de tensão e corrente RMS, obtidas da curva de saturação, em valores do tipo fluxo e corrente. Na primeira coluna são definidos os valores de corrente e na segunda coluna são definidos os valores de tensão correspondentes. O valor "9999" na última linha dos dados indica o fim da característica não linear da relação entre tensão e corrente.

**Figura 29** – Criação do arquivo SAT.atp.



Fonte: Autoria própria.

O arquivo SAT.atp deve ser processado pelo *ATP Launcher*, ou pelo executável do ATP "*tpbig.exe*" por meio do prompt de comando do *windows* (necessário que o arquivo esteja no mesmo diretório do executável).

**Figura 30** – Execução do SAT.atp pelo prompt de comando.

```

c:\ Prompt de Comando
Microsoft Windows [versão 10.0.19045.5371]
(c) Microsoft Corporation. Todos os direitos reservados.

C:\Users\Brenda_Vitor>cd C:\ATP\GNUATP
C:\ATP\GNUATP>tpbigG.exe SAT.atp
  
```

Fonte: Autoria própria.

Ao executar o arquivo SAT240.atp, a função *punch* irá criar um novo arquivo SAT240.pch. No arquivo SAT240.pch os dados em RMS estarão comentados (terão a letra C no início de cada linha), e abaixo serão apresentados os valores de fluxo e corrente, conforme apresentado no código a seguir.

```

1 C <++++++> Cards punched by support routine on 19-Jan-25 22:33:51
  <++++++>
2 C SATURATION
3 C 60.      .001      1.E-6      1      0
4 C          .01          9.
5 C          .04          90.
6 C          0.1          428.
7 C          .12          500.
8 C          .14          600.
9 C          0.2          700.
10 C         0.3          780
11 C         0.4          800
12 C         40.0         927
13 C          9999
14 1.41421356E-02  3.37618619E-02
15 5.36733089E-02  3.37618619E-01
16 1.31694552E-01  1.60556410E+00
17 1.75046597E-01  1.87565899E+00
18 1.89134128E-01  2.25079079E+00
19 3.41310866E-01  2.62592259E+00
20 5.61072569E-01  2.92602803E+00
21 9.75998771E-01  3.00105439E+00
22 9.43968011E+01  3.47747177E+00
23          9999

```

Programa 2 – Código SAT.pch com pares de fluxo-corrente para parâmetro do TC

No *Software ATPDraw*, o transformador foi modelado por meio do componente *SATTRAF01*. Aos parâmetros, são aplicadas algumas considerações acerca dos elementos do circuito, conforme apresentado na tabela abaixo. A Figura 31 expõe a os parâmetros inseridos na configuração do componente de transformador saturável no *Software ATPDraw*.

Para testar o TC modelado, é realizada a conexão com uma fonte de tensão e uma resistência, conforme a Figura 32. A fonte em ATP foi definida para um pico de 707,1 V ou 500 V RMS. A resistência é definida como 1 ohm.

**Tabela 1** – Valores de atributos de transformadores saturáveis em ATPDraw

| Variável e valor atribuído | Descrição  |
|----------------------------|--|
| $I_0 = 0$                  | Corrente através do ramo magnetizador (MB) em estado estacionário.                           |
| $F_0 = 0$                  | Fluxo [Wb-espira] em MB em estado estacionário.  |
| $R_{Mag} = 0$              | Resistência no ramo magnetizante, em Ohm. (0 = resistência infinita)                         |
| $R_P = 0.576$              | Resistência no enrolamento primário, em Ohm.   |
| $L_P = 0$                  | Indutância no enrolamento primário, em Ohm, se $X_{opt.}$ = frequência de potência.          |
| $V_{RP} = 240$             | Tensão nominal [kV] no enrolamento primário;   |
| $R_S = 0$                  | Resistência no enrolamento secundário, em Ohm.   |
| $L_S = 1E-7$               | Indutância no enrolamento secundário, em Ohm, se $X_{opt.}$ = frequência de potência.        |
| $V_{RS} = 1$               | Tensão nominal [kV] no enrolamento secundário.   |
| $RMS = 0$                  | Sinalizador de recurso não linear.<br>A característica de corrente/fluxo deve ser integrada. |

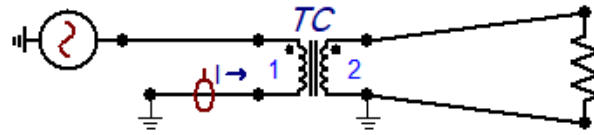
Fonte: SEL

**Figura 31** – Modelagem TC.

Fonte: Autoria própria.

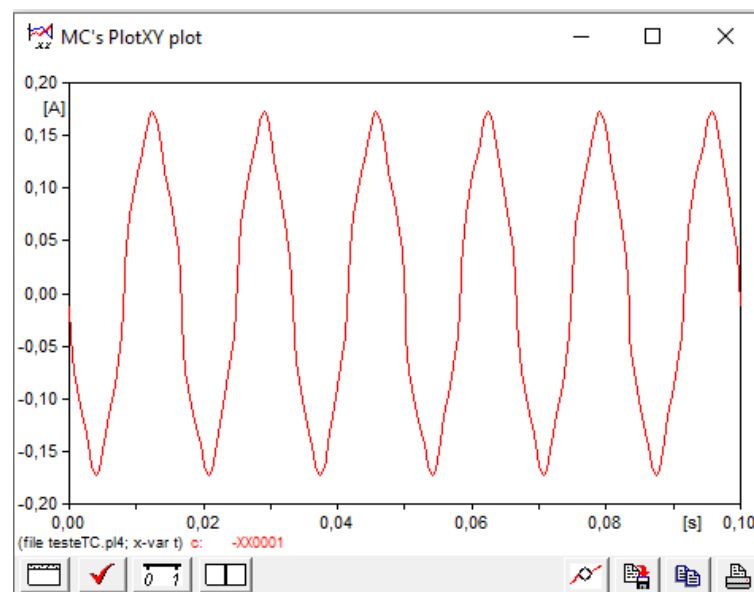
Do arquivo *SAT240.atp*, a 500 V, a corrente de excitação secundária deve ser 0,12 A RMS. Ao gerar o gráfico da corrente, conforme Figura 33, e obtemos o valor de pico de 0,172503 A, correspondente a 0,1219 A RMS, validando o modelo com 1,58% de erro. O código .atp referente ao teste é exposto abaixo.

Figura 32 – Modelagem TC em ATPDraw.



Fonte: Autoria própria.

Figura 33 – Corrente de excitação secundária.



Fonte: Autoria própria.

```

1 BEGIN NEW DATA CASE
2 C -----
3 C Generated by ATPDraw fevereiro, 9, 2025
4 C from project C:\Users\Brenda_Vitor\Pictures\testeTC.acp
5 C ATPDraw developed by H. K. H idalen at NTNU - NORWAY 1999-2022
6 C -----
7 C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt ><Epsiln>
8     1.E-6     .1
9     500       1       1       1       1       0       0       1
10
11 /MODELS
12 MODELS
13 INPUT
14     MM0001 {i(C1)}
15 MODEL IMPRIME

```

```

15
16 INPUT
17 i
18
19
20 EXEC
21     writel(t, i)
22 ENDEXEC
23 ENDMODEL
24 USE IMPRIME AS DEFAULT
25 INPUT
26     i:= MM0001
27 ENDUSE
28 ENDMODELS
29 C          1          2          3          4          5          6
30 C          7          8
31 /BRANCH
32 C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< L >< C >
33 C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
34 TRANSFORMER TX0001
35 C <++++++> Cards punched by support routine on 19-Jan-25 22:33:51
36 C SATURATION
37 C 60. .001 1.E-6 1 0
38 C .01 9.
39 C .04 90.
40 C 0.1 428.
41 C .12 500.
42 C .14 600.
43 C 0.2 700.
44 C 0.3 780
45 C 0.4 800
46 C 40.0 927
47 C 9999
48 1.41421356E-02 3.37618619E-02
49 5.36733089E-02 3.37618619E-01
50 1.31694552E-01 1.60556410E+00
51 1.75046597E-01 1.87565899E+00
52 1.89134128E-01 2.25079079E+00

```

```

53 3.41310866E-01 2.62592259E+00
54 5.61072569E-01 2.92602803E+00
55 9.75998771E-01 3.00105439E+00
56 9.43968011E+01 3.47747177E+00
57          9999
58 1XX0001C1          .576          240.
59 2XX0002          1.E-7          1.
60  XX0002          100.
0
61 /SWITCH
62 C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde ><  Ie  ><Vf/CLOP ><  type  >
63          C1          MEASURING
1
64 /SOURCE
65 C < n 1><>< Ampl.  >< Freq.  ><Phase/T0><  A1  ><  T1  >< TSTART >< TS
>
66 14XX0001          701.1          60.
-1.          100.
67 /OUTPUT
68 BLANK MODELS
69 BLANK BRANCH
70 BLANK SWITCH
71 BLANK SOURCE
72 BLANK OUTPUT
73 BLANK PLOT
74 BEGIN NEW DATA CASE
75 BLANK

```

Programa 3 – Código .atp para teste de modelagem de TC saturável

### 3.3 Programa de processamento de dados

Para otimizar o processamento, foram criadas duas rotinas automatizadas no MATLAB, capaz de gerar diversos arquivos ATP em sequência. As rotinas foram divididas na modelagem do sistema com faltas aterradas e faltas sem aterramento. As rotinas utilizam como ponto de partida um arquivo texto ATP, obtido a partir dos arquivos ilustrados na Figura 25, originalmente gerado pelo ATPDraw. Ao simular o sistema, é criado o arquivo com extensão .atp correspondente, bem como é gerado o arquivo do *Models*, em extensão .1, com os dados de saída de tensão e corrente dos dois terminais da LT. No MATLAB, diferentes versões do arquivo são criadas com ajustes nos parâmetros do circuito. Esses arquivos modificados são então processados no ATP, permitindo a simulação de 800 cenários distintos, gerados pela combinação dos parâmetros. As variações consideraram diferentes posições de falta, tipos de curto-circuito, valores de impedância e ângulos de incidência, conforme dados da tabela abaixo. Os códigos são apresentados nos Apêndices B e C.

**Tabela 2** – Parâmetros de variação do sistema

| Parâmetros do sistema                        |   |                    |                      |
|--|---|--------------------|----------------------|
| Posições                                     | Tipo de curto-circuito                              | Impedância         | Ângulo de incidência |
| 10,5 km, 63 km,<br>105 km, 147 km,<br>189 km | AT, BT, CT,<br>ABT, ACT,<br>BCT, AB, AC,<br>BC, ABC | 1, 50,<br>100, 500 | 0°, 30°,<br>60°, 90° |

Fonte: Autoria própria.

O código de geração dos arquivos ATP funciona mudando a nomenclatura do ponto de conexão entre o ramo trifásico da falta e a linha (para modificar os locais), e modificando os valores de resistência, ângulo e tipo no texto do arquivo ATP. Por esse motivo é necessária a criação de blocos LCC para cada trecho da linha de transmissão, para que seja possível alterar o local de falta por meio da modificação apenas da nomenclatura do nó a que a falta está conectada.

#### 3.3.1 Procedimento para geração e simulação de arquivos em série

##### 3.3.1.1 Geração de arquivos .atp em série

Após a modelagem do sistema no *ATPDraw*, o código de geração de arquivos deve ser adaptado, de acordo com o arquivo .atp do sistema modelado. O código funciona

**Tabela 3** – Parâmetros referência do sistema

| Variável de referência | Valor a ser substituído |
|------------------------|-------------------------|
| Ângulo de incidência   | .045                    |
| Impedância             | 888                     |
| Local de falta         | B10.5A                  |
|                        | B10.5B                  |
|                        | B10.5C                  |

Fonte: Autoria própria.

alterando valores do arquivo .atp base. Para isso, é procurado no arquivo .atp valores de referência para cada uma das variáveis a serem alteradas. Esses valores de referência são especificados no código, que os localiza no arquivo .atp, calcula a quantidade de bytes até o ponto a ser alterado, e sobrepõe a escrita do parâmetro.

O código permite a alteração dos parâmetros: comprimento da LT, impedância de falta, ângulo de incidência da falta e tipo de falta. Os parâmetros definidos na tabela 2 são especificados no início do código. No sistema em questão, os valores de referência são apresentados na tabela 3. O tipo de falta é controlado pela abertura e fechamento das chaves através dos valores de instante de incidência da falta. Quando o instante de incidência da falta está em um número demasiadamente grande, a chave está fechada. Se estiver com o parâmetro base de .045 (que poderia ser outro valor de instante válido), está aberta.

Ao rodar o código, os arquivos serão criados e armazenados na pasta designada pelo diretório definido. Neste caso, a pasta "Registros". Também será criado um arquivo executável nomeado "simular\_arquivos\_atp".

### 3.3.1.2 Execução de arquivos .atp em série

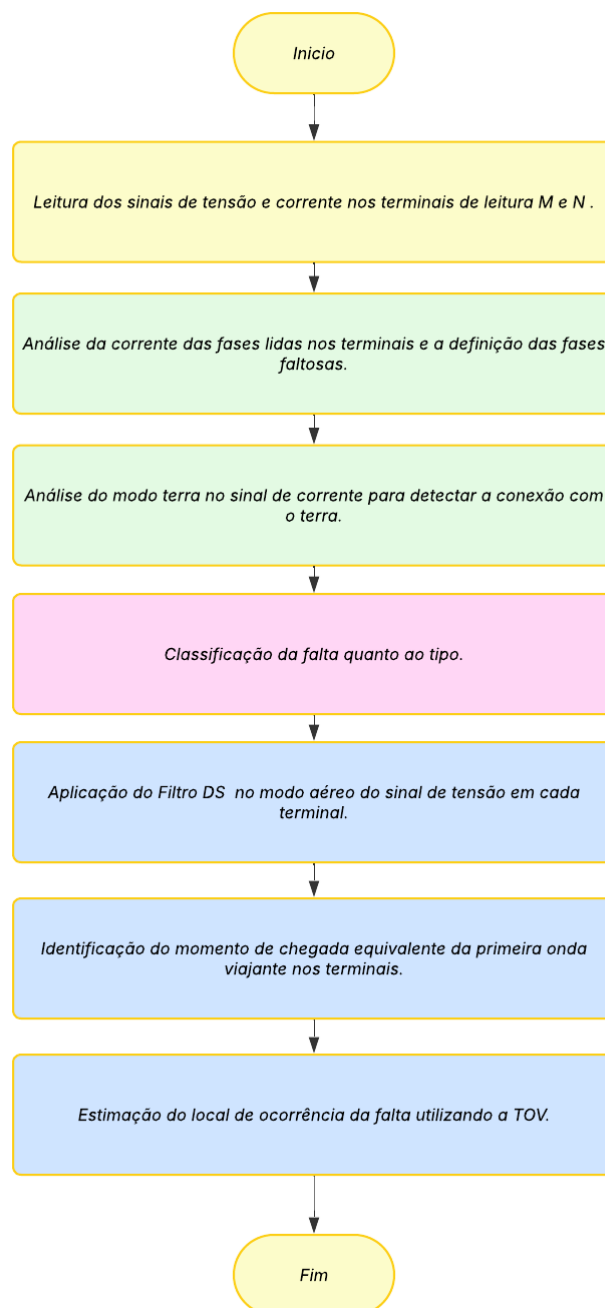
Após a geração dos arquivos ATP por meio do código Matlab, é necessário copiá-los para o mesmo diretório do arquivo tpbigG.exe do *ATPDraw*. O arquivo "simular\_arquivos\_atp" também deve ser adicionado ao mesmo diretório e posteriormente deve ser executado. Dessa forma, todos os arquivos .atp serão processados, gerando como saída arquivos com extensão .1, que contém valores de tensão e corrente. Após executar, os arquivos contendo os dados de tensão e corrente serão gravados no mesmo diretório.

As faltas envolvendo terra e sem envolvimento de terra são modeladas de forma distintas, a fim de permitir o acionamento de chaves pelo código, conforme descrito. Dessa forma, foi necessária a criação de dois códigos, um para faltas aterradas e o segundo para faltas sem envolvimento do terra. Os códigos são apresentados nos Apêndices C e D.

### 3.4 Metodologia e resultados para o sistema sem equipamentos de medição

Os passos para a metodologia seguida são apresentados no fluxograma da Figura 34.

Figura 34 – Metodologia para a localização da falta.



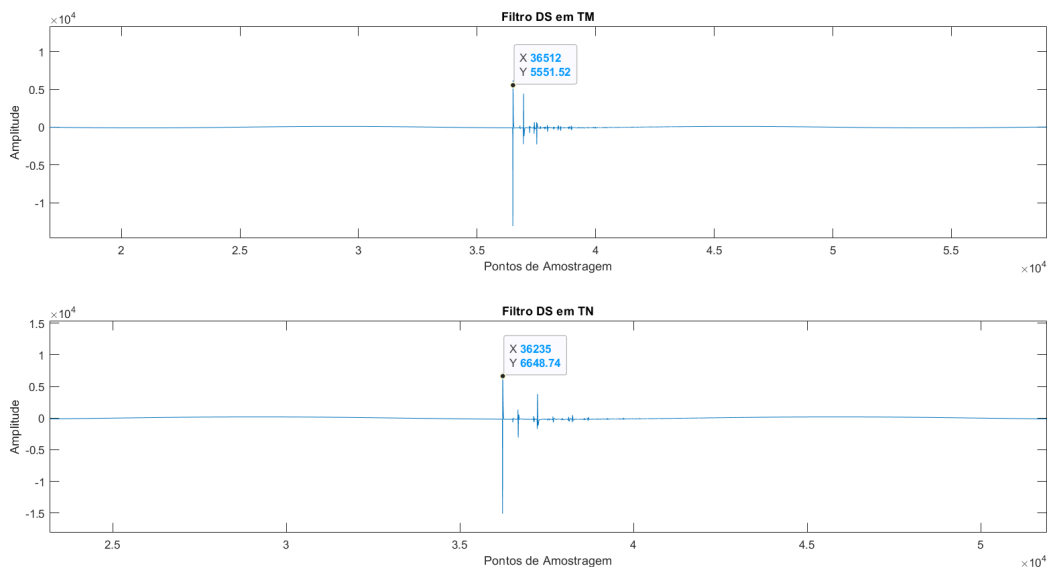
Fonte: Autoria própria.

A fim de localizar o ponto de ocorrência da falta, foram utilizados dados de dois ter-

minais, que, de acordo com a literatura, apresentam maior precisão na localização. Foram analisadas 800 combinações de faltas do sistema base e 800 combinações para o sistema com TC. Após a realização da simulação e do processamento dos dados para localização da falta, foi necessário tratar os resultados finais do cálculo. Nesse contexto, os valores *outliers* foram removidos para evitar que mascarassem os resultados e comprometessem a interpretação da precisão do método. A presença de erros extremos pode ser resultado de condições específicas da simulação, como reflexões inesperadas, ruídos numéricos ou limitações no modelo utilizado. Ao eliminar esses valores discrepantes, garantiu-se que a análise dos erros refletisse com maior fidelidade o desempenho real do método de localização da falta, permitindo uma avaliação mais precisa da sua confiabilidade e aplicabilidade prática.

O filtro DS é aplicado antes da análise por ondas viajantes. A principal função desse filtro é suavizar e diferenciar os sinais de corrente e tensão medidos nos terminais da linha, destacando variações rápidas associadas às frentes de onda geradas por uma falta. No MATLAB, para aplicação do Filtro DS, foi utilizado o janelamento padrão da função nativa da ferramenta, aplicando 10 coeficientes de janelamento. Isso permite que um balanceamento entre a atenuação de ruídos e a preservação das características essenciais do sinal seja realizada. Para exemplificar o procedimento é utilizado um dos casos simulados. Foram aplicados dados de uma falta AT, impedância de 100 Ohms, ângulo de incidência de  $60^\circ$  a 70% do comprimento da linha.

**Figura 35** – Aplicação do filtro DS em sinais de tensão de falta AT.



Fonte: Autoria própria.

A linha de transmissão tem um comprimento total de:

$$L = 210 \text{ km} = 210 \times 10^3 \text{ m} \quad (40)$$

A velocidade de propagação da onda na linha é:

$$v = 296,827 \times 10^3 \text{ m/s} \quad (41)$$

Os tempos de chegada das ondas viajantes nos terminais M e N, de acordo com a figura, são dados por:

$$t_M = 0,03651 \text{ s}, \quad t_N = 0,03624 \text{ s} \quad (42)$$

A diferença de tempo entre a chegada das ondas nos dois terminais é:

$$\Delta t = t_M - t_N \quad (43)$$

Substituindo os valores:

$$\Delta t = 0,03651 - 0,03624 \quad (44)$$

$$\Delta t = 0,000278 \text{ s} \quad (45)$$

A equação geral para a distância da falta em relação ao terminal M é dada por:

$$d_M = \frac{L + v \cdot \Delta t}{2} \quad (46)$$

Substituindo os valores conhecidos, obtemos:

$$d_M = 146258,9 \text{ m} = 146,25 \text{ km} \quad (47)$$

Portanto, a falta está localizada aproximadamente a 145,07 km do terminal M.

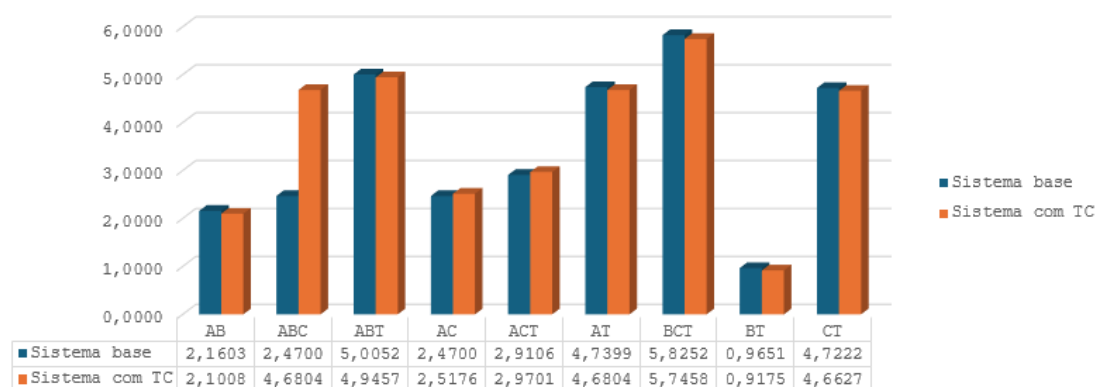
A distância da falta em relação ao terminal N pode ser calculada de forma semelhante.

Para uma falta a 70% da LT de 210 km, temos ponto de incidência em 147 km. De acordo com os valores obtidos, temos acurácia de 99,65%, se apresentando como um bom resultado.

### 3.5 Resultados da análise da localização de faltas em sistemas com e sem TC

Os resultados provenientes da localização do ponto de incidência da falta na LT no sistema base e no sistema com TC foram tratados e analisados, conforme explanação a seguir.

**Figura 36** – Erro médio (%) da localização de faltas em LT por tipo de falta em sistemas com e sem TC.



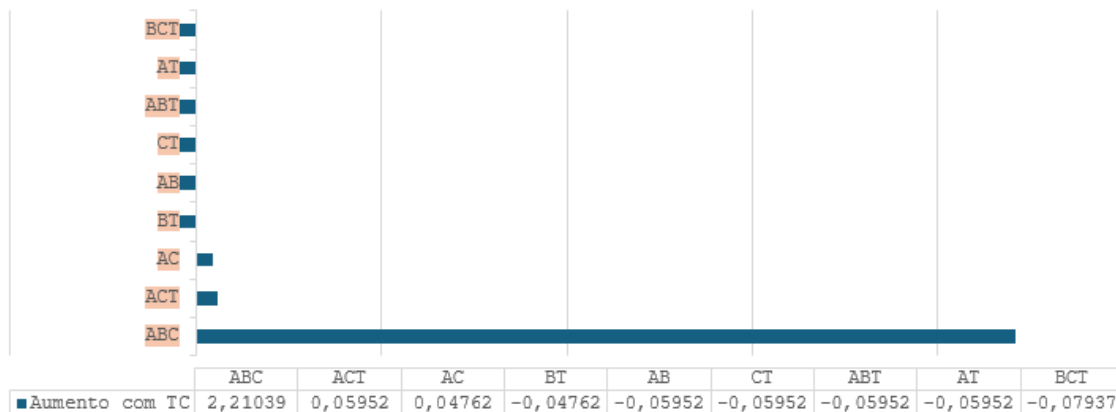
Fonte: Autoria própria.

A Figura 36 apresenta o erro percentual médio do sistema base e do sistema com inserção dos equipamentos de medição. O erro percentual considerando todos os locais de falta foram segmentados de acordo com o tipo de falta, sendo fixados o ângulo de incidência em  $60^\circ$  e a resistência de falta em  $100 \Omega$ . A partir dos gráficos analisados, observou-se que a presença dos TCs influenciaram de forma não uniforme a precisão da localização das faltas.

Para faltas trifásicas (ABC), o erro médio apresentou aumento, enquanto para faltas monofásicas aterradas (AT, BT e CT), constatou-se uma redução em comparação ao sistema base sem TC, indicando que a interferência dos TCs pode ser favorável em determinadas condições. A Figura 37 apresenta o aumento do erro médio percentual devido à inserção de TCs. Valores apresentados como negativos indicam que houve redução do erro. A variação no erro pode ser explicada pela sensibilidade dos algoritmos de localização de faltas a mudanças na resposta dinâmica do sistema e à introdução de atrasos de fase e saturação nos TC, que afetam a qualidade das medições.

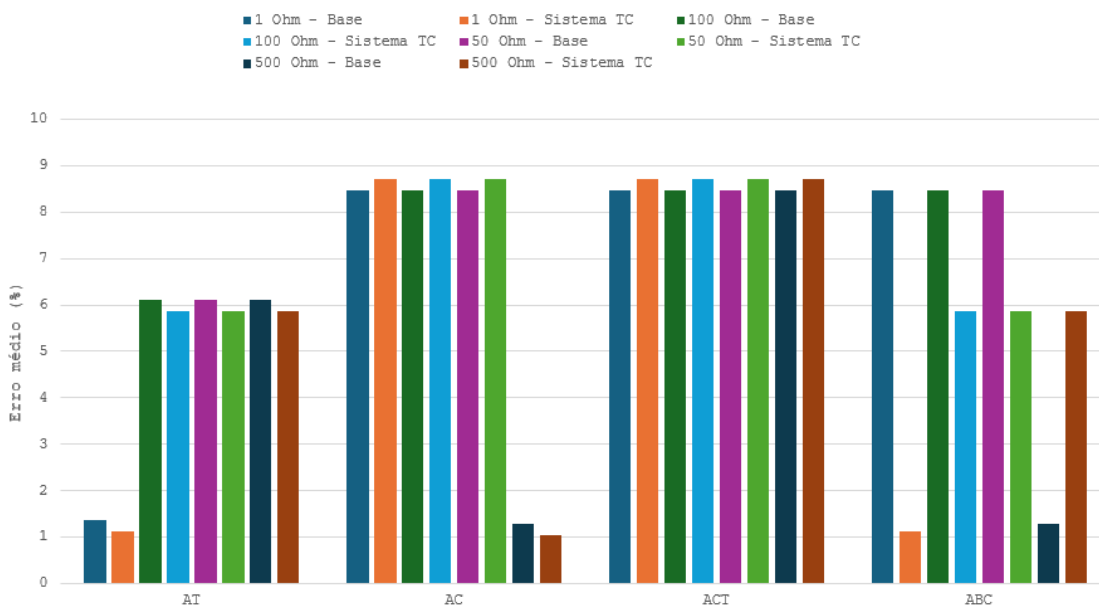
A partir da Figura 38, é verificada a relação entre a impedância da falta e o erro na localização segmentada por tipo de falta. Foram escolhidas as faltas do tipo AT, AC, ACT e ABC, representando faltas monofásicas aterradas, bifásicas, bifásicas aterradas e trifásicas. O ângulo de incidência e o local de ocorrência percentual foram fixados em  $60^\circ$  e

**Figura 37** – Aumento de erro médio (%) com inserção de TC no sistema de LT.



Fonte: Autoria própria.

**Figura 38** – Erro médio (%) da localização de faltas por resistência e tipo de falta em sistema com e sem TC para ângulo de incidência a 60° e local de incidência a 5% da LT.

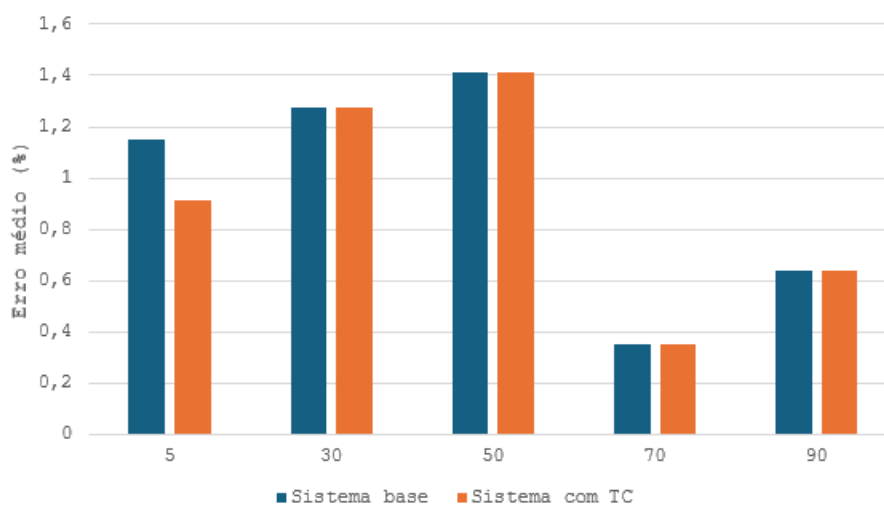


Fonte: Autoria própria.

5% da LT. Em faltas monofásicas, o erro permanece com valor reduzido para impedâncias pequenas ( $5 \Omega$ ), enquanto para médias e altas impedâncias o comportamento permanece semelhante entre eles. Em faltas bifásicas, nota-se o comportamento inverso, com menores erros mediante maiores impedâncias.

O erro médio (%) da localização de faltas em LT é apresentado segmentado por local de ocorrência percentual na Figura 39, com o comparativo de sistema com e sem TC. Foram fixados o tipo de falta, o ângulo de incidência e a resistência a falta, sendo estas faltas BT com ângulo de incidência a 60° e resistência de falta em 100 . É observado

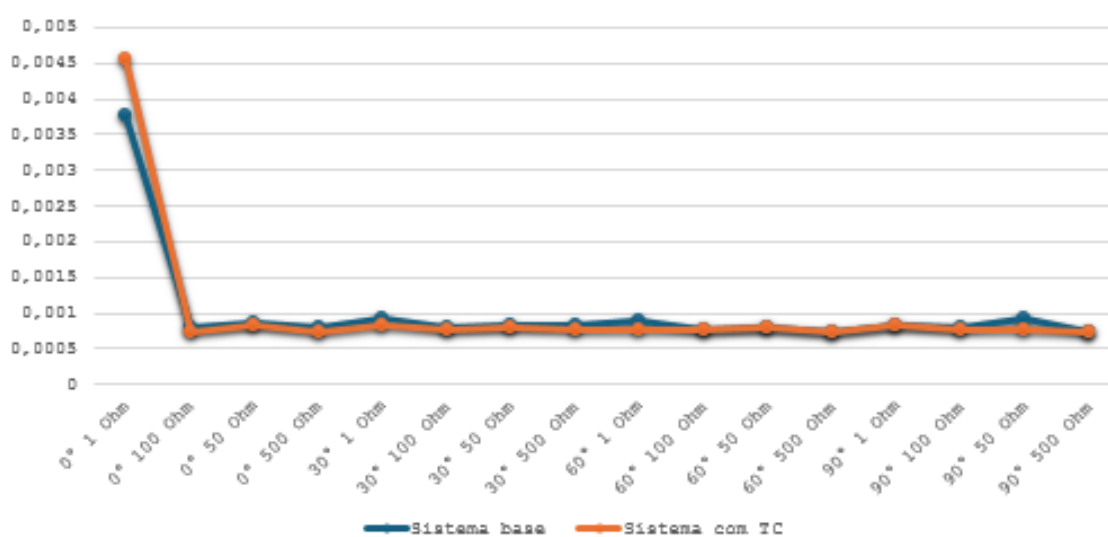
**Figura 39** – Erro médio (%) da localização de faltas em LT por local de ocorrência percentual em sistema com e sem TC para faltas BT com ângulo de incidência a  $60^\circ$  e resistência de falta em  $100 \Omega$ .



Fonte: Autoria própria.

que, para esse cenário, o comportamento mediante local de incidência apresentou alteração apenas para faltas a 5% da LT, em que o sistema com TC apresentou melhores resultados. Para os demais casos, o erro permaneceu inalterado. Para os parâmetros definidos, é possível notar maiores erros em faltas a 50% da LT, e de forma a contrastar, os melhores resultados apresentados foram a 70% da LT.

**Figura 40** – Custo computacional médio total por ângulo de incidência e resistência de falta.



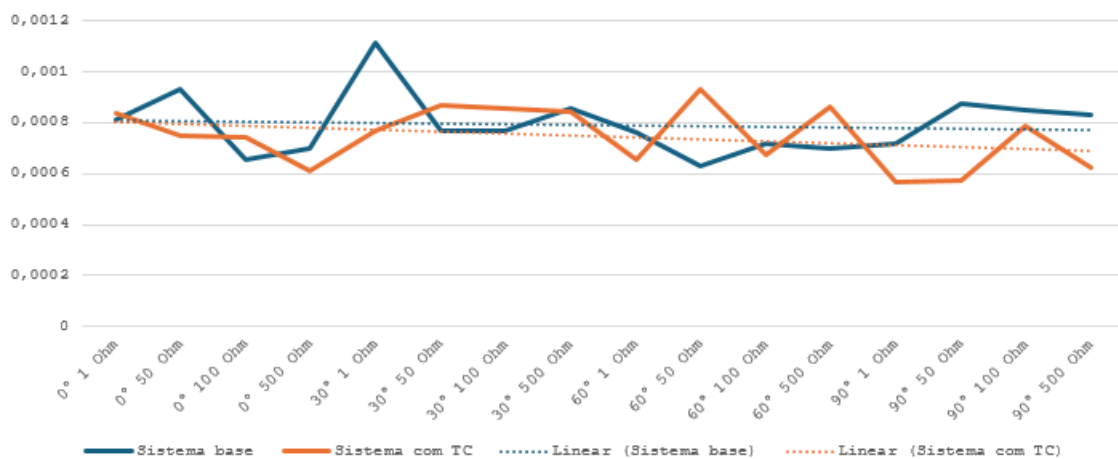
Fonte: Autoria própria.

O gráfico da Figura 40 expõe o custo computacional médio total por ângulo de incidência e resistência de falta. Por meio da análise é possível afirmar que faltas a  $0^\circ$  e

resistência em 1 Ohm tem maior custo computacional, o que é corroborado pela teoria, que apresenta que faltas com ângulos de incidência próximos a zero tendem a apresentar um erro maior pela difícil localização, levando a um maior tempo de processamento. Para este caso, o sistema com TC apresentou um aumento de 0,8196 ms. Os demais casos apresentam comportamento com baixa variação, permeando 0,8 ms.

Ao fixar o tipo de falta em AT e o local de incidência a 70% da LT, é possível observar o custo computacional com maior detalhe. Nota-se que o maior custo computacional foi a 1 Ohm e 30° para o sistema base, já com a inserção dos TCs houve redução considerável. Observando a linha de tendência, nota-se que o sistema base apresenta maior custo computacional para este caso. Além disso, este valor tende a cair com o aumento do ângulo de incidência.

**Figura 41** – Custo computacional de acordo com o ângulo de incidência e a resistência de falta AT a 70% da LT.



Fonte: Autoria própria.

---

## CONCLUSÃO

Este estudo investigou a influência dos dispositivos de medição na localização de faltas em linhas de transmissão, com base na Teoria das Ondas Viajantes e no Filtro DS. A análise demonstrou que a presença de transformadores de corrente (TCs) pode impactar a precisão da localização da falta, tanto positiva quanto negativamente, dependendo das condições do sistema. Em alguns casos, a inserção do TC contribuiu para a redução do erro médio na estimativa da posição da falta, enquanto, em outros, a interferência causada pelos dispositivos comprometeu a acurácia dos resultados.

A aplicação do Filtro DS mostrou-se essencial para aprimorar a qualidade dos sinais analisados, permitindo uma extração mais precisa das frentes de onda associadas às faltas. Com o uso do janelamento padrão do MATLAB®, foi possível reduzir ruídos indesejados e melhorar a definição dos instantes de chegada das ondas aos terminais da linha, aumentando a confiabilidade do método de localização.

Os resultados obtidos reforçam que o método de Ondas Viajantes, aliado ao Filtro DS, apresenta alta acurácia na localização de faltas, mesmo na presença de dispositivos de medição. No entanto, a influência dos TCs deve ser cuidadosamente considerada, sendo necessária a aplicação de técnicas de compensação para minimizar possíveis erros. Como continuidade deste estudo, recomenda-se a investigação de novos modelos para mitigar os impactos dos dispositivos de medição, bem como a avaliação de estratégias que possam otimizar o desempenho do método em diferentes cenários operacionais.

---

## APÊNDICE A

### 5.1 Código de geração de arquivos .atp em série para sistema com faltas envolvendo terra via Matlab

```
1
2 %C D I G O   P A R A   G E R A   O   D E   A R Q U I V O S   . A T P   C O M   F A L T A S   E N V O L V E N D O   T E R R A
3
4 % Limpa o console e define variáveis de controle de erro
5 clear;
6 clc;
7
8 % Muda o diretório atual para o especificado e armazena o caminho real
9
10 b=cd('C:\ATP\ATPDraw\Atp'); %esse diretório deve conter uma pasta "Regist
11 realpath = pwd;
12
13 % Define os parâmetros do sistema
14 locais = 5; angulos = 4; impedancias = 4; tipos = 6; % sistema escolhido
15
16 % Define os valores dos parâmetros
17 loc = {'10.5', '0063', '0105', '0147', '0189'};
18 ang = {'000', '030', '060', '090'};
19 imp = {'0001', '0050', '0100', '0500'};
20 tip = {'_AT', '_BT', '_CT', 'ABT', 'ACT', 'BCT'};
21
22
```

```
23 % Define o arquivo do sistema modelo .atp na variavel modelo_ATP
24 modelo_ATP = 'SistemaBase.atp';
25
26 % Cria e abre um arquivo .bat para escrita, na pasta "Registros"
27 fd3 = fopen('Registros\\simular_arquivos_atp.bat', 'w');
28
29 % Escreve comandos no arquivo .bat, que executado no prompt de comando
30 fprintf(fd3, 'ECHO_OFF\n'); %desativa a exibição dos comandos que estão
31 fprintf(fd3, 'REM\n'); %permite comentários no arquivo .bat
32 fprintf(fd3, 'cd\C:\\ATP\\GNUATP\n'); %define o diretório do arquivo tpbig
33
34 %os arquivos .ATP gerados posteriormente por esse código devem estar no
35 %mesmo diretório do programa tpbigG.exe (copiar os arquivos gerados para
36 %l )
37 %o programa tpbigG.exe executa arquivos .atp
38
39 % Laços para percorrer todas as combinações de locais, ângulos, imped
40 for i = 1:locais
41     for j = 1:angulos
42         for k = 1:impedancias
43             for l = 1:tipos
44
45                 % Cria o nome do arquivo ATP com base na combinação atual
46                 arquivo_ATP = sprintf('Registros\\%sang%SZ%s%.atp', loc{i},
47                 arquivo_1 = sprintf('%sang%SZ%s%.1', loc{i}, ang{j}, imp{k});
48
49                 % Adiciona comandos ao arquivo .bat
50                 fprintf(fd3, 'tpbigG_%sang%SZ%s%.atp\n', loc{i}, ang{j},
51                 fprintf(fd3, 'REN_MODELS.1_%s\n', arquivo_1); %renomeia o
52                 fprintf(fd3, '@if exist *.dbg del *.dbg\n'); %exclui os ar
53                 fprintf(fd3, 'REM\n');
54
55                 fd1 = fopen(modelo_ATP, 'r'); %abre arquivo para leitura
56                 fd2 = fopen(arquivo_ATP, 'w'); %abre arquivo para escrita
57                 nL = 1;
58                 linha = fgets(fd1);
59                 fprintf(fd2, '%s', linha);
60
61
62                 while ~feof(fd1)
63                     nL = nL + 1;
```

```
64         linha = fgets(fd1);
65         fprintf(fd2, '%s', linha);
66         end
67
68
69 % NGULO
70 %30, 60 e 90, 00
71 % Aqui altera a parametriza o do ngulo
72
73 x=[48 48 48]; %000
74
75 defineang = {'false', 'false', 'false', 'false'}; %seta a vari vel para
76
77 for z=1:angulos
78     if strcmp(ang{z}, ang{j})
79         defineang(z) = {'true'};
80     end
81 end
82
83 verific000 = {'true', 'false', 'false', 'false'};
84 verific030 = {'false', 'true', 'false', 'false'};
85 verific060 = {'false', 'false', 'true', 'false'};
86 verific090 = {'false', 'false', 'false', 'true'};
87
88 if isequal(defineang, verific000) %verifica se as vari veis l gicas s
89     x = [48 51 51]; % 000 (0,033 s) = 033 % c digo ascii para o n merco
90 elseif isequal(defineang, verific030)
91     x = [48 51 53]; % 030 (0,035 s) = 035
92 elseif isequal(defineang, verific060)
93     x = [48 51 54]; % 060 (0.036 s) = 036
94 elseif isequal(defineang, verific090)
95     x = [48 51 56]; % 090 (0,038 s) = 008
96 end
97
98 % A- 2481+130
99 % B- 2417
100 % C- 2581
101
102
103 %Calcular quantos bytes tem at a posi o do ngulo de incid ncia n
104 %c digo .atp
```

```
105
106     % Define o caminho do arquivo
107 b = cd('C:\ATP\ATPDraw\Atp');
108 arquivo = 'SistemaBase.atp';
109
110 % L o conte do do arquivo
111 conteudo = fileread(arquivo);
112
113 % Define o caractere a ser buscado
114 AnguloIncidenciaSetado = '.045'; % Substitua pelo valor desejado
115
116 % Encontra TODAS as posi es do caractere alvo
117 posicoes = strfind(conteudo, AnguloIncidenciaSetado);
118
119 if length(posicoes) < 3
120     fprintf('Menos de tr s ocorr ncias de "%s" foram encontradas no arqu
121 else
122     % Converte a string completa para bytes assumindo codifica o UTF-8
123     conteudo_bytes = unicode2native(conteudo, 'UTF-8');
124
125     % Obt m os bytes at a primeira, segunda e terceira ocorr ncias
126     BytesIncidenciaA = length(unicode2native(conteudo(1:posicoes(1)-1), 'U
127     BytesIncidenciaB = length(unicode2native(conteudo(1:posicoes(2)-1), 'U
128     BytesIncidenciaC = length(unicode2native(conteudo(1:posicoes(3)-1), 'U
129     % BytesTerra = length(unicode2native(conteudo(1:posicoes(4)-1), 'UTF-8'
130 end
131
132
133
134
135     fseek(fd2, BytesIncidenciaA, 'bof'); %Move o ponteiro para o byte 2112
136     fwrite(fd2, x, 'char'); %modifica o ngulo para fase A
137     fseek(fd2, BytesIncidenciaB, 'bof');
138     fwrite(fd2, x, 'char'); %modifica o ngulo para fase B
139     fseek(fd2, BytesIncidenciaC, 'bof');
140     fwrite(fd2, x, 'char'); %modifica o ngulo para fase C
141
142
143     %TIPO DE FALTA
144     %0 valor num rico da fun o fseek indica a quantidade de caracteres
145     %valor a ser alterado
```

```
146     %Altera a parametriza o
147
148     x = [57 46 57 57 57]; %corresponde ao valor 9.999, que far a chave
149
150     definetip = {'false', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false', 'fa
151
152     for z=1:tipos
153         if strcmp(tip{z}, tip{1})
154             definetip(z) = {'true'};
155         end
156     end
157
158     verifictipAT = {'true', 'false', 'false', 'false', 'false', 'false', '
159     verifictipBT = {'false', 'true', 'false', 'false', 'false', 'false', '
160     verifictipCT = {'false', 'false', 'true', 'false', 'false', 'false', '
161     verifictipABT = {'false', 'false', 'false', 'true', 'false', 'false', '
162     verifictipACT = {'false', 'false', 'false', 'false', 'true', 'false', '
163     verifictipBCT = {'false', 'false', 'false', 'false', 'false', 'true', '
164
165
166     %Faltas com Terra
167
168
169     if isequal(definetip, verifictipAT)
170
171         % AT: Na defini o do tipo, a a o fseek/fwrite substitui o temp
172         % que n o queremos que operem para o tempo de 9.999 segundos
173         % A fun o fseek posiciona o cursor de acordo com a quantidade de
174         % caracteres anteriores (que o valor num rico na funcao)
175
176
177         fseek(fd2, (BytesIncidenciaB-2), 'bof'); %abre a chave da falta em B
178         fwrite(fd2, x, 'char');
179         fseek(fd2, (BytesIncidenciaC-2), 'bof'); %abre a chave da falta em C
180         fwrite(fd2, x, 'char');
181
182
183     elseif isequal(definetip, verifictipBT)
184         % BT
185         fseek(fd2, (BytesIncidenciaA-2), 'bof');
186         fwrite(fd2, x, 'char'); %modifica o ngulo para fase A
```

```
187     fseek(fd2, (BytesIncidenciaC-2), 'bof');
188     fwrite(fd2, x, 'char'); %modifica o ngulo para fase C
189
190
191     elseif isequal(definetip, verifictipCT)
192         % CT
193         fseek(fd2, (BytesIncidenciaA-2), 'bof');
194         fwrite(fd2, x, 'char'); %modifica o ngulo para fase A
195         fseek(fd2, (BytesIncidenciaB-2), 'bof'); %abre a chave da falta em B
196         fwrite(fd2, x, 'char');
197
198
199     elseif isequal(definetip, verifictipABT)
200         % ABT
201         fseek(fd2, (BytesIncidenciaC-2), 'bof'); %abre a chave da falta em C
202         fwrite(fd2, x, 'char');
203
204
205     elseif isequal(definetip, verifictipACT)
206         % ACT
207         fseek(fd2, (BytesIncidenciaB-2), 'bof'); %abre a chave da falta em B
208         fwrite(fd2, x, 'char');
209
210
211     elseif isequal(definetip, verifictipBCT)
212         % BCT
213         fseek(fd2, (BytesIncidenciaA-2), 'bof'); %abre a chave da falta em A
214         fwrite(fd2, x, 'char');
215
216
217 end
218
219
220 x=[48 48 48]; %000
221
222 defineang = {'false', 'false', 'false', 'false'}; %seta a variavel para
223
224 for z=1:angulos
225     if strcmp(ang{z}, ang{j})
226         defineang(z) = {'true'};
227     end
```

```
228     end
229
230
231 %IMPED NCIA
232 % Aqui altera a parametriza o da imped ncia
233 x = [46 48 48 48 49];
234
235 defineimp = {'false', 'false', 'false', 'false'}; %seta a vari vel para
236
237 for z=1:impedancias
238     if strcmp(imp{z}, imp{k})
239         defineimp(z) = {'true'};
240     end
241 end
242
243 %Calcular quantos bytes tem at a posi o do ngulo da imped ncia n
244 %c digo .atp
245
246 % Define o caminho do arquivo
247 b = cd('C:\ATP\ATPDraw\Atp');
248 arquivo = 'SistemaBase.atp';
249
250 % L o conte do do arquivo
251 conteudo = fileread(arquivo);
252
253 % Define o caractere a ser buscado
254 ImpedanciaSetado = '888'; % Substitua pelo valor desejado
255
256 % Encontra TODAS as posi es do caractere alvo
257 posicoes = strfind(conteudo, ImpedanciaSetado);
258
259 % Converte a string completa para bytes assumindo codifica o UTF-8
260 conteudo_bytes = unicode2native(conteudo, 'UTF-8');
261
262 % Obt m os bytes at a primeira, segunda e terceira ocorr ncias
263 BytesImpedancia = length(unicode2native(conteudo(1:posicoes(1)-2), 'UTF-8'));
264
265
266 verificimp01 = {'true', 'false', 'false', 'false'};
267 verificimp50 = {'false', 'true', 'false', 'false'};
268 verificimp100 = {'false', 'false', 'true', 'false'};
```

```
269 verificimp500 = {'false', 'false', 'false', 'true'};
270
271 if isequal(defineimp, verificimp01)
272     x = [48 48 49]; % c digo ascii para o n mero , vai de 48 =0 at 57
273         % imp = 001
274 elseif isequal(defineimp, verificimp50)
275     x = [48 53 48]; % imp = 050
276 elseif isequal(defineimp, verificimp100)
277     x = [49 48 48]; % imp = 100
278 elseif isequal(defineimp, verificimp500)
279     x = [53 48 48]; % imp = 500
280 end
281
282
283 %quantidade de caracteres da imped ncia da falta
284
285 fseek(fd2,BytesImpedancia, 'bof');
286 fwrite(fd2, x, 'char');
287
288
289 %LOCAIS
290 % Aqui altera a parametriza o do local
291 x = [46 48 48 48 49];
292
293 defineloc = {'false', 'false', 'false', 'false', 'false'}; %seta a vari v
294
295 for z=1:locais
296     if strcmp(loc{z}, loc{i})
297         defineloc(z) = {'true'};
298     end
299 end
300
301 verificlocA = {'true', 'false', 'false', 'false', 'false'};
302 verificlocB = {'false', 'true', 'false', 'false', 'false'};
303 verificlocC = {'false', 'false', 'true', 'false', 'false'};
304 verificlocD = {'false', 'false', 'false', 'true', 'false'};
305 verificlocE = {'false', 'false', 'false', 'false', 'true'};
306
307
308 if isequal(defineloc, verificlocA)
309     x = [49 48 46 53]; % '10.5'
```

```
310 elseif isequal(defineloc, verificlocB)
311     x = [48 48 54 51]; % '0063'
312 elseif isequal(defineloc, verificlocC)
313     x = [48 49 48 53]; % '0105'
314 elseif isequal(defineloc, verificlocD)
315     x = [48 49 52 55]; % '0147'
316 elseif isequal(defineloc, verificlocE)
317     x = [48 49 56 57]; % '0189'
318 end
319
320
321
322 %Calcular quantos bytes tem at a posi o do local da falta no c dig
323
324 % Define o caminho do arquivo
325 b = cd('C:\ATP\ATPDraw\Atp');
326 arquivo = 'SistemaBase.atp';
327
328 % L o conte do do arquivo
329 conteudo = fileread(arquivo);
330
331 % Define o caractere a ser buscado
332 LocalASetado = 'B10.5A'; % Substitua pelo valor desejado
333 LocalBSetado = 'B10.5B';
334 LocalCSetado = 'B10.5C';
335
336 % Encontra TODAS as posi es do caractere alvo
337 posicaoLocalA = strfind(conteudo, LocalASetado);
338 posicaoLocalB = strfind(conteudo, LocalBSetado);
339 posicaoLocalC = strfind(conteudo, LocalCSetado);
340
341
342 % Converte a string completa para bytes assumindo codifica o UTF-8
343 posicaoLocalA_bytes = unicode2native(conteudo, 'UTF-8');
344 posicaoLocalB_bytes = unicode2native(conteudo, 'UTF-8');
345 posicaoLocalC_bytes = unicode2native(conteudo, 'UTF-8');
346
347 % Obt m os bytes at a primeira, segunda e terceira ocorr ncias
348 BytesIncidenciaA = length(unicode2native(conteudo(1:(posicaoLocalA-1)))
349 BytesIncidenciaB = length(unicode2native(conteudo(1:(posicaoLocalB-1)))
350 BytesIncidenciaC = length(unicode2native(conteudo(1:(posicaoLocalC-1)))
```

```
351
352
353
354 % Os valores numéricos do fseek indicam as posições dos dados que precisam
355 %que são as 3 fases do local do curto-circuito, onde a chave de curto se
356
357 fseek(fd2, BytesIncidenciaA, 'bof'); %faltaB
358 fwrite(fd2, x, 'char');
359 fseek(fd2, BytesIncidenciaB, 'bof'); %faltaA
360 fwrite(fd2, x, 'char');
361 fseek(fd2, BytesIncidenciaC, 'bof'); %faltaC
362 fwrite(fd2, x, 'char');
363
364     fclose(fd1);
365     fclose(fd2);
366         end
367     end
368 end
369 end
370
371
372 fclose(fd3);
```

Programa 4 – Código de geração de arquivos .atp em série para sistema com faltas envolvendo terra via Matlab

---

## Referências Bibliográficas

ABEID, A. M.; EL-GHANY, H. A. A.; AZMY, A. M. *An advanced traveling-wave fault-location algorithm for simultaneous faults*. Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo, Egypt, p. 747–752, 2017. DOI: 10.1109/MEPCON.2017.8301265.

ABRADEE. A Distribuição de Energia. Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica, 2017. Acesso em: 15 out. 2023. Disponível em: <[https://abradee.org.br/arquivos/cartilha/2019/Modulo\\_01.pdf](https://abradee.org.br/arquivos/cartilha/2019/Modulo_01.pdf)>.

BARROS, R. M. R. *Gestão da Perda Não Técnica de Energia Elétrica*. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2023.

CAMINHA, A. C. *Introdução a Proteção dos Sistemas Elétricos*. São Paulo: EDGARD BLUCHER, 1977. ISBN 978-85-212-0136-6.

CHAITANYA, B. K.; ANDANAPALLI, K.; VARMA, B. R. K. *Fault location for double-circuit transmission lines using travelling-wave theory with unsynchronized measurements*. International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Sustainable Growth (ICEPE), p. 1–6, 2015.

DAS, S.; SANTOSO, S.; ANANTHAN, S. N. *Fault Location on Transmission and Distribution Lines*. Hoboken, NJ: John Wiley Sons Ltd, 2022. ISBN 9781119121473.

FEDOROV, A. et al. *Traveling Wave Fault Location Reliability Improving*. International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russian Federation, p. 278–282, 2021. DOI: 10.1109/UralCon52005.2021.9559617.

FILHO, J. M. M.; MAMEDE, D. R. *Proteção de sistemas elétricos de potência*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2020. ISBN 978-85-216-3720-2.

GALE, P. et al. *Fault location based on travelling waves*. Fifth International Conference on Developments in Power System Protection., p. 54–59, 1993.

GRAINGER, J. J.; STEVENSON, J. W. D. *Power System Analysis*. New York: McGraw-Hill, 1994. ISBN 10: 0070612935.

IEC. *IEC 61869-2 - Instrument transformers 3 Part 2: Additional requirements for current transformers*. [S.l.]: IEC, 2012.

LIMA, D. A. C. *Power System Analysis*. Porto Alegre: [s.n.], 2013.

LOPES, F.; KÜSEL, B.; SILVA, K. *Traveling Wave-Based Fault Location on Half-Wavelength Transmission Lines*. IEEE Latin America Transactions, v. 14, n. 1, p. 248–253, 2016. DOI: 10.1109/TLA.2016.7430086.

OLIVEIRA, A. P.; MOREIRA, F. A.; PICANÇO, A. F. Aplicação da transformada de hilbert-huang na localização de faltas em linhas de transmissão utilizando a teoria das ondas viajantes. SAB Sociedade Brasileira de Automática, IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE, v. 2, n. 1, 2022. DOI: 10.20906/sbse.v2i1.3017.

ONS. A expansão da transmissão. Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2023. Acesso em: 15 out. 2023. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/energia-no-futuro/transmissao/expansao>>.

ONS. Mapas. Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2023. Acesso em: 15 out. 2023. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>>.

ONS. O que é o SIN. Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2023. Acesso em: 15 out. 2023. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>.

ONS. O sistema em números. Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2023. Acesso em: 15 out. 2023. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>>.

POWELL, L. J. Current transformer burden and saturation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-15, n. 3, p. 294–303, 1979. DOI: 10.1109/TIA.1979.4503656.

ROBBA, E. J. et al. *Análise de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica*. São Paulo: Blucher, 2020. ISBN 10: 6555060077.

SAADAT, H. *Power System Analysis*. New York: McGraw-Hill, 1999. ISBN 9780070122352.

SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J. J.; ROSOLOWSKI, E. *Fault Location on Power Networks*. New York, NY: Springer-Verlag, 2010. DOI: 10.1007/978-1-84882-886-5.

SAWAI, S.; GORE, R. N.; NAIDU, O. *Novel Traveling Wave Phase Component-based Fault Location of transmission lines*. Jaipur, India, p. 1–5, 2020. DOI: 10.1109/PEDES49360.2020.9379861.

TRENTO, S. Asteca – ferramenta de simulação para análise de tc's. *Jornadas Técnicas ISA 2015: Innovación para la eficiencia*, 2015.

VASCONCELOS, F. M. D. *Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica*. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2017. ISBN 978-85-522-0179-3.

XUN, L. et al. *Study on accuracy traveling wave fault location method of overhead line — Cable hybrid line and its influencing factors*. Chinese Automation Congress (CAC), p. 4593–4597, 2017. DOI: 10.1109/CAC.2017.8243590.

YE, H. et al. *A novel single-phase grounding fault location method with traveling wave for distribution networks*. 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), p. 1175–1179, 2015. DOI: 10.1109/DRPT.2015.7432412.

ZANETTA, J. L. C. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. São Paulo: EDUSP, 2020. v. 2. ISBN 10: 8531407559.

ZOU, Y. et al. *Traveling-wave based fault location with high grounding resistance for HVDC transmission lines*. IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), p. 1651–1655, 2016. DOI: 10.1109/APPEEC.2016.7779773.

Coruja $\text{\TeX}$



Este volume foi tipografado em  $\text{\LaTeX}$  na classe  $\text{\CorujaTeX}$  como uma demanda do Colegiado do curso de Engenharia Elétrica da **UFOB!** (**UFOB!**)  
([https://github.com/ademariocarvalho/CCEE\\_UFOB\\_CorujaTEX](https://github.com/ademariocarvalho/CCEE_UFOB_CorujaTEX)).