



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

JOSÉ LUCAS DAMASCENO HOLANDA



Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE FATORES QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO DE
MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande - PB
2020

JOSÉ LUCAS DAMASCENO HOLANDA

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE FATORES QUE INFLUENCIAM O
DESEMPENHO DE MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE
TRANSMISSÃO

*Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenadoria do Curso
de Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
em cumprimento às exigências para
obtenção do Grau de Bacharel em
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Damásio Fernandes Júnior, D.Sc.

Orientador

Campina Grande
2020

JOSÉ LUCAS DAMASCENO HOLANDA

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE FATORES QUE INFLUENCIAM O
DESEMPENHO DE MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM
LINHAS DE TRANSMISSÃO

*Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenadoria do Curso
de Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
em cumprimento às exigências para
obtenção do Grau de Bacharel em
Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Aprovado em ____ / ____ / _____

Professor Damásio Fernandes Júnior, D.Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Professor Karcus Marcelus Colaço Dantas
Universidade Federal de Campina Grande
Convidado, UFCG

Dedico este trabalho aos meus pais, Jesuína e Irineu, à minha irmã Sarah e à minha namorada Ana Paula por me ensinarem a ter fé e acreditar que somos capazes de fazer nosso próprio destino.

AGRADECIMENTOS

Toda esta trajetória só foi possível, é claro, com todo o apoio dos meus pais, Irineu Holanda Neto e Jesuína Maria Muniz Damasceno Holanda, desde o dia da matrícula até o presente momento. Paralelamente, todos da família damasceno foram sempre muito cordiais e atenciosos nas conquistas e nos momentos mais delicados.

Além disso, é preciso destacar que o suporte, carinho, apoio e os conselhos de Tia Olguinha, Tio Dario e família foram muito importantes para uma maturação pessoal e profissional durante esta jornada.

Minha segunda mãe, Tia Gorete, esteve sempre presente mesmo do outro lado do Nordeste, acreditando e investindo sempre na melhor formação dos seus sobrinhos. Esta sua fé me motivou e me motiva bastante a sempre buscar meu melhor para melhorar o mundo em que vivemos. Minha segunda irmã, Laís, era sempre uma grande alegria conversar com você. Claro, minha irmã, Sarah, é sempre muito alegre poder contar com você em tudo.

À toda a Prole da Irá e, inclusive, à própria vó Iracema, preciso, primeiramente, pedir desculpas por lhe desobedecer e fazer esse curso perigoso, mas extremamente gratificante e, por conseguinte, agradecer à toda a família pelo apoio e carinho por acreditarem em mim desde o início (Vó, eu não subi nos postes, juro).

Preciso agradecer, também, a Ana Paula por ser meu maior exemplo de força, foco e comprometimento. Você me inspira. Em todas as vezes que precisamos ser fortes e unidos em momentos de crise e de dificuldade, riscamos sempre o “s”. **CRISE. CRIE.**

Agradeço, imensamente, a todos os integrantes do 15.1 por terem sido a melhor companhia que já tive até então desde as rotinas de estudo até às discussões técnicas que duravam dias até chegar à consensos. Espero que nossa amizade sirva de exemplo para criarmos novos laços em nosso futuro profissional que está por vir.

Todos os integrantes do Laboratório de Alta Tensão e do Laboratório de Sistemas de Potência, em especial meus orientadores de PIBIC, professor Damásio Fernandes e Ronimack Trajano.

Todos os profissionais terceirizados que eram responsáveis por manter a nossa Universidade mais acolhedora e organizada, em especial os funcionários da biblioteca, da limpeza e da segurança. E todos com o quais tive a honra de dividir apartamento.

*“Quanto mais nos elevamos,
menores parecemos aos olhos
daqueles que não sabem
voar.”*

Friedrich Nietzsche

RESUMO

O processo de localização de faltas consiste na estimação do local do distúrbio por meio do tratamento dos sinais de tensão e/ou de corrente monitorados nos terminais da linha de transmissão. De acordo com o processamento realizado, os meios de localização do distúrbio podem ser classificados como técnicas baseadas em frequência fundamental ou na teoria de ondas viajantes, fazendo com que algumas aplicações sejam preferíveis em detrimento de outras devido à capacidade de serem imunes a alguns fatores presentes no sistema elétrico de potência, como o desempenho dos transformadores de potencial capacitivos, as características dos curtos-circuitos e a taxa de amostragem. Desse modo, a análise proposta neste trabalho apresenta os fatores que influenciam o desempenho de métodos de localização de faltas, sendo dois baseados em componentes fundamentais e um baseado na teoria de ondas viajantes. Diante disso, é feito um comparativo entre o desempenho dos métodos avaliados, destacando os principais fatores capazes de influenciar um processo de localização de faltas de modo preciso.

Palavras-chave: Localização de faltas, linhas de transmissão, componente de frequência fundamental, ondas viajantes.

ABSTRACT

The fault location procedure consists in estimate the location of the disturbance by treating the voltage and/or current signals monitored at the transmission line terminals. According to the processing performed, the means of locating the fault may be classified as fundamental frequency or traveling wave based techniques, making some applications preferable to others due to the ability of being immune to certain factors present in the electric power system as the dynamic behavior of the coupling capacitor voltage transformers, the characteristics of the short-circuits and the sampling rate. In this way, the analysis proposed here looks for the factors that influence the performance of fault location methods, two of them based on fundamental components and one based on traveling wave theory. Therefore, a comparison is made between the performance of the evaluated methods, highlighting the main factors capable of influencing a fault location process in a precise way.

Keywords: Fault location, transmission lines, fundamental frequency, traveling waves.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – SIN.....	14
Figura 2 – Sistema Elétrico de Potência.....	18
Figura 3 – Canal de comunicação em um SEP.....	19
Figura 4 – Configuração do SEP durante o defeito.....	19
Figura 5 – SEP de sequência negativa.....	21
Figura 6 – Diagrama de Reflexões para Faltas em Linhas de Transmissão.....	22
Figura 7 – Diagrama de Reflexões para Faltas em Linhas de Transmissão.....	24
Figura 8 – Transformada de Park em Sistema Trifásico Equilibrado.....	24
Figura 9 – Exemplo de detecção inicial de um distúrbio, utilizando Tdq0: (a) Sinais de tensão trifásicos; (b) Coeficientes cdif; (c) Coeficientes cdif2.....	25
Figura 10 – Topologia do TPC 1.....	27
Figura 11 – Implementação do TPC 1 no ATP.....	27
Figura 12 – Topologia do TPC 2.....	28
Figura 13 – Implementação do TPC 2 no ATP.....	29
Figura 14 – Topologia do TPC 3.....	29
Figura 15 – Implementação do TPC 3 no ATP.....	29
Figura 16 – Representação de LT a parâmetros distribuídos.....	31
Figura 17 – Implementação da LT no ATP.....	32
Figura 18 – Implementação do SEP de 230 kV no ATP.....	32
Figura 19 – Implementação da LT no ATP.....	33
Figura 20 – Ferramenta <i>ImportData</i> do MATLAB.....	35
Figura 21 – Influência do tipo de falta sobre os métodos avaliados.....	37
Figura 22 – Influência da resistência de falta sobre os métodos avaliados.....	38
Figura 23 – Influência do ângulo de incidência de falta sobre os métodos avaliados.....	39
Figura 24 – Influência do ângulo de incidência de falta sobre o MOV2T.....	40
Figura 25 – Influência da taxa de amostragem sobre o MOV2T.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros dos TPC 1, 2 e 3 utilizados.	30
Tabela 2 – Parâmetros da linha de transmissão.	32
Tabela 3 – Parâmetros dos Equivalentes 1 e 2 de Thévenin.	33
Tabela 4 – Variáveis analisadas.	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ATP – Alternative Transient Program

GPS – Global Positioning System

LT – Linha de Transmissão

MCF2T – Método de Componentes Fundamentais de Dois Terminais

MCF1T – Método de Componentes Fundamentais de Um Terminal

MOV2T – Método de Ondas Viajantes de Dois Terminais

SEP – Sistema Elétrico de Potência

SIN – Sistema Interligado Nacional

TC – Transformador de Corrente

TPC – Transformador de Potencial Capacitivo

LISTA DE SÍMBOLOS

kV – quilovolt

km – quilômetro

SUMÁRIO

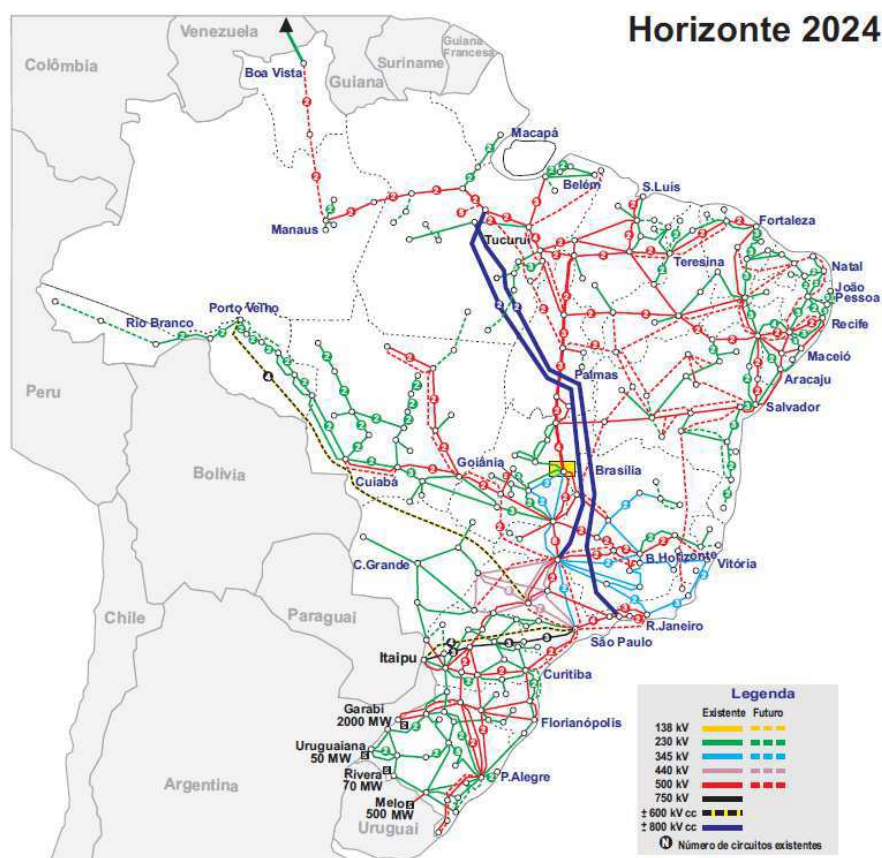
1	Introdução.....	14
1.1	Objetivos.....	16
1.2	Estrutura do Texto.....	16
2	Fundamentação teórica.....	17
2.1	Localização de faltas em linhas de transmissão.....	17
2.2	Sistema elétrico de potência.....	17
2.3	Estimação baseada em componentes fundamentais.....	18
2.3.1	Método de um terminal.....	19
2.3.2	Método de dois terminais.....	20
2.4	Localização baseada na teoria de ondas viajantes.....	22
2.4.1	Transformada de Park.....	23
3	Materiais e métodos.....	26
3.1	Materiais.....	26
3.2	Metodologia.....	26
4	Análise dos Resultados.....	36
5	Conclusão.....	42
	Referências.....	43

1 INTRODUÇÃO

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é composto por dois grandes sistemas, conversão e transmissão de energia elétrica. Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, o sistema de conversão é hidro-termo-eólico e os blocos de energia são transmitidos das usinas para os centros consumidores por meio do sistema de transmissão.

Atualmente, o SIN possui 141.756 km de Linhas de Transmissão (LT) por todo território brasileiro, sendo 53.739 km das LT de 230 kV, ou seja, 37,91 % de todo o sistema de transmissão (ONS, 2020). As projeções para 2024 estimam 68.339 km de LT de 230 kV, totalizando uma expansão de 14.600 km de rede apenas neste nível de tensão. Diante desta magnitude, na Figura 1, é possível constatar a atual e a futura rede do SIN no horizonte de 2024.

Figura 1 – SIN.



Fonte: ONS (2020).

Na Figura 1, também é possível constatar o grau de complexidade e a predominância da malha de 230 kV para interligar com o modo mais confiável e viável possível as regiões, as grandes usinas e os centros de cargas, permitindo, além do mais, o intercâmbio de energia com outros países.

Devido aos extensos comprimentos, as LT estão submetidas à ocorrência de distúrbios. Dependendo da ocasião, as faltas podem ocasionar danos mecânicos aos equipamentos presentes no sistema de transmissão, sendo necessário repará-los antes de retornar à operação da LT (SUTHERLAND, 2015). Além disso, SUTHERLAND (2015) destaca os impactos atribuídos às faltas, como esforço adicional à estrutura mecânica das torres, da cadeia de isoladores e dos condutores. Com isso, é, primordialmente, necessário estimar o local de defeito de forma eficaz e eficiente, viabilizando o reparo de possíveis equipamentos danificados e a restauração do serviço o mais breve possível.

Basicamente, a localização de modo automático de faltas é realizada por meio dos sinais de tensão e de corrente obtidos pelos dispositivos de monitoramento instalados nos terminais da LT. Isso é possível devido à alta capacidade computacional dos relés digitais e à presença de canais de comunicação entre pontos remotos das LT. A depender do tipo de distúrbio, os métodos de localização de faltas podem ser classificados, segundo SAHA (2010), como técnicas baseadas em componentes fundamentais (TAKAGI et al., 1982) e em técnicas baseadas em ondas viajantes (GALE et al., 1993; LOPES, 2014).

Neste cenário, os métodos de localização de faltas são decisivos para minimizar os inconvenientes ocasionados por distúrbios nos Sistemas Elétricos de Potência (SEP). Estes métodos têm como objetivo estimar o ponto de curto-circuito de modo mais confiável e mais preciso, sendo necessário realizar, portanto, um conjunto de estudos sobre quais fatores podem comprometer a confiabilidade das técnicas de localização disponíveis na literatura, contribuindo para a melhoria dos algoritmos de detecção de faltas e/ou no desenvolvimento de técnicas mais confiáveis.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa é realizar uma análise comparativa dos fatores que mais podem influenciar o desempenho dos métodos de localização de faltas em linhas de transmissão.

Como objetivos específicos, tem-se:

- Implementação de métodos de localização de faltas em LT baseados na teoria de ondas viajantes e em componentes fundamentais de um e de dois terminais.
- Avaliação do desempenho dos métodos frente à variação dos parâmetros das linhas de transmissão.
- Avaliação da influência dos transformadores de potencial capacitivos (TPC) sobre os métodos implementados.
- Verificação da influência da taxa de amostragem dos conversores A/D sobre os métodos em análise.

1.2 ESTRUTURA DO TEXTO

Além deste capítulo introdutório, este trabalho de conclusão de curso está organizado de acordo com a seguinte estrutura:

No capítulo 2, é apresentada a fundamentação teórica que sustenta toda a motivação deste trabalho, detalhando os elementos necessários para embasar esta pesquisa.

No capítulo 3, os materiais utilizados para desenvolver o trabalho são detalhados.

No capítulo 4, é descrito a metodologia estrutural do trabalho de forma detalhada e objetiva de desenvolvimento.

No capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos do comparativo entre os fatores que influenciam o desempenho dos métodos de localização de faltas em LT de 230 kV.

No capítulo 6, por fim, são apresentadas as constatações do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

Conforme apresentado anteriormente, as LT estão submetidas a distúrbios devido a diversos fatores, como intempéries, contato direto de animais ou de árvores com as LT, falhas de isolamento dos equipamentos do SEP, entre outros. Com o intuito de acelerar o reestabelecimento do serviço e de melhorar a confiabilidade de operação do SEP, os métodos de detecção de faltas são bastante utilizados, segundo o IEEE (2015).

Diante disso, a localização de faltas consiste em estimar, por meio do processamento dos sinais de tensão e de corrente medidos nos terminais da LT, o local do distúrbio. Segundo SAHA (2010), os meios de localização do distúrbio podem ser enquadrados em diversas categorias, como técnicas baseadas em componentes fundamentais e métodos baseados em ondas viajantes, seguindo os procedimentos descritos no guia de localização de faltas publicado pelo IEEE (2015), bem como, todos os procedimentos de cálculo para estimação dos locais de faltas em LT desta pesquisa estão alinhados com as diretrizes do guia.

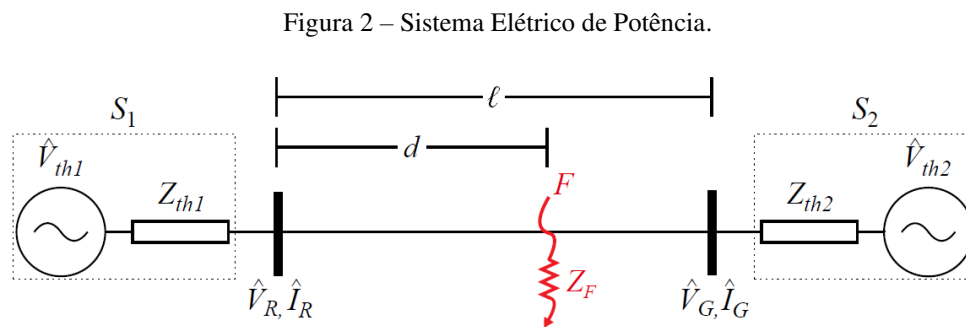
Por fim, consideraram-se apenas os métodos baseados em ondas viajantes de dois terminais e em componentes fundamentais de um e de dois terminais, os quais são descritos, posteriormente, nas seções 2.3 e 2.4.

2.2 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Na Figura 2, apresenta-se o SEP que serve como base para o desenvolvimento matemático dos métodos de um e de dois terminais. Este sistema consiste de uma LT que interliga dois circuitos equivalentes de Thévenin nos terminais R e G , ou seja, a barra local e remota, respectivamente, sendo Z_{th1} e Z_{th2} as respectivas impedâncias.

Paralelamente, os fasores de tensão e de corrente medidos no terminal local R são \hat{V}_R e \hat{I}_R , respectivamente. Por conseguinte, os fasores de tensão e de corrente medidos no terminal remoto, G , são \hat{V}_G e \hat{I}_G , respectivamente.

Por fim, l , é o comprimento total da LT, d é a distância do ponto de falta para o terminal R , F é o ponto de falta e Z_F é a impedância de falta.



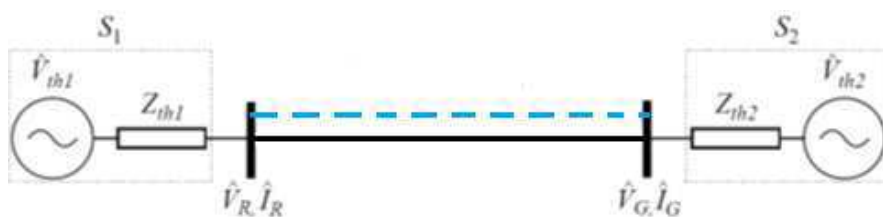
Fonte: LOPES (2014).

2.3 ESTIMAÇÃO BASEADA EM COMPONENTES FUNDAMENTAIS

Conhecendo-se os parâmetros da LT, a distância da falta pode ser obtida, estimando a impedância aparente por meio dos fasores de corrente e de tensão de um ou mais terminais monitorados da linha de transmissão. Esta técnica é conhecida como método baseado em impedância (SAHA et al., 2010; DAS et al., 2014; IEEE, 2015).

Estes métodos baseados em impedância são os mais simples e econômicos, já que a impedância estimada representa apenas uma parcela da impedância total da LT. Isso pode ser feito por meio de duas formas. A primeira seria o método de um terminal, ou seja, sinais de tensão e corrente são adquiridos em apenas um terminal monitorado da LT. A segunda, por sua vez, seria o método de dois terminais, ou seja, sinais de tensão e corrente são adquiridos em dois terminais monitorados da LT, exigindo um canal de comunicação entre os dois terminais. Na Figura 3 é ilustrado este cenário, sendo o canal de comunicação em fibra óptica representado pela linha em azul tracejada.

Figura 3 – Canal de comunicação em um SEP.

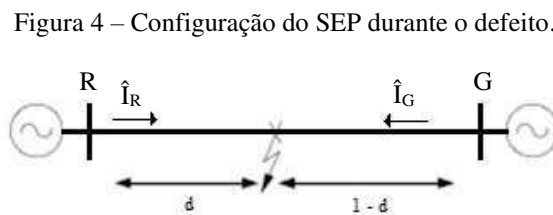


Fonte: Adaptado de LOPES (2014).

2.3.1 MÉTODO DE UM TERMINAL

A maior vantagem para utilização dos métodos de um terminal consiste no fato de não depender de canais de comunicação entre os terminais da LT, destacando também a simplicidade de implementação. Por outro lado, será abordado que a característica da impedância de falta pode ser o fator limitante para o desempenho deste tipo de método (SAHA et al., 2010; DAS et al., 2014).

Sabendo disso na Figura 4, é possível constatar que, durante a falta, há uma contribuição de ambas as barras para alimentar a corrente de defeito.



Fonte: Adaptado de IEEE (2014).

Deste modo, tem-se que a tensão na Barra R é escrita por meio da Equação 1:

$$\hat{V}_R = dZ_L\hat{I}_R + Z_F\hat{I}_F. \quad (1)$$

Dividindo-se toda a Equação 1 por \hat{I}_R , têm-se na Equação 2:

$$Z_{aparente} = \frac{\hat{V}_R}{\hat{I}_R} = dZ_L + \frac{Z_F\hat{I}_F}{\hat{I}_R}. \quad (2)$$

Neste cenário, as variáveis d , Z_F e \hat{I}_F são desconhecidas. No entanto, a sutileza do Método de Componentes Fundamentais de Um Terminal (MCF1T) está em considerar que a impedância de falta é puramente resistiva, ou seja, os fasores de corrente, \hat{I}_F e \hat{I}_R , apresentam-se em fase, não apresentando, assim, componentes imaginárias. Deste modo, extraindo apenas as componentes imaginárias da Equação 2, têm-se na Equação 3:

$$imag\left(\frac{\hat{V}_R}{\hat{I}_R}\right) = d \cdot imag(Z_L) \Rightarrow d = \frac{imag\left(\frac{\hat{V}_R}{\hat{I}_R}\right)}{imag(Z_L)}. \quad (3)$$

Desta forma, é possível estimar o local de falta por meio da Equação 3. Este algoritmo é chamado de Método de Reatância Simples (MRS). Porém, é evidente que a eficácia do método é afetada pela natureza da impedância de falta (DAS *et al.*, 2014).

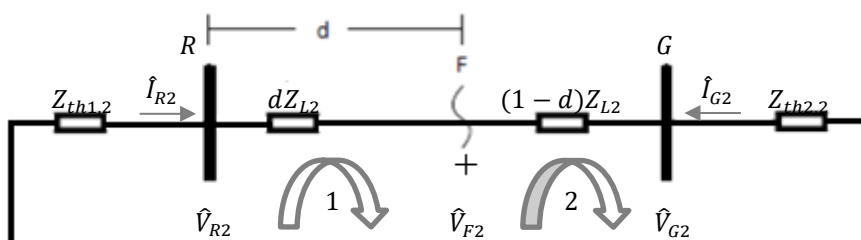
2.3.2 MÉTODO DE DOIS TERMINAIS

Com o intuito de elevar a precisão dos métodos de um terminal, a existência de um canal de comunicação entre ambos os terminais monitorados viabilizou a aplicação do Método Baseado em Componentes Fundamentais de Dois Terminais (MCF2T) (SAHA *et al.*, 2010; DAS *et al.*, 2014). Isso é possível, segundo DAS (2014), devido à não dependência dos erros causados pela impedância de falta, Z_F , carregamento ou não homogeneidade do SEP.

Por conseguinte, outro grande diferencial do método de dois terminais é a independência da etapa de classificação da falta em relação aos métodos de um terminal. Paralelo a isso, devido à necessidade de um canal de comunicação para transferência de dados de medição entre ambos os terminais da LT, o uso de um *Global Positioning System* (GPS) permite a sincronização dos dados dos terminais por meio de uma referência de tempo comum (LOPES, 2014).

Diante disso, neste trabalho, adotou-se a técnica reportada em DAS *et al.* (2014), utilizando as componentes de sequência negativa para estimar a distância de falta, d , pois estas componentes não são afetadas pela corrente de carga, acoplamento mútuo de sequência zero e imprecisões de sequência zero da LT. Na Figura 5, apresentam-se todas as variáveis necessárias para estimar o local de falta, sendo \hat{V}_{R2} e \hat{V}_{G2} as respectivas tensões da barra local e da barra remota, \hat{I}_{R2} e \hat{I}_{G2} as respectivas correntes de sequência negativa dos terminais da barra local e da barra remota e Z_{L2} a impedância de sequência negativa da LT.

Figura 5 – SEP de sequência negativa.



Fonte: Autoria própria.

Com base na análise de malhas, é possível obter as seguintes Equações 4 e 5:

$$\hat{V}_{F2} = \hat{V}_{R2} - dZ_{L2}\hat{I}_{R2}, \quad (4)$$

$$\hat{V}_{F2} = \hat{V}_{G2} - (1 - d)Z_{L2}\hat{I}_{G2}. \quad (5)$$

Com estas duas equações, é possível isolar a variável d , obtendo-se o MCF2T na Equação 6:

$$d = \frac{\hat{V}_{R2} - \hat{V}_{G2} + Z_{L2}\hat{I}_{G2}}{(\hat{I}_{R2} + \hat{I}_{G2})Z_{L2}}. \quad (6)$$

Além disso, vale ressaltar que, segundo DAS et al. (2014), a Equação 6 é aplicada exclusivamente para faltas não simétricas, como faltas monofásicas, bifásicas e bifásicas para terra. Para faltas simétricas, por sua vez, as componentes de sequência negativa não existem. Diante disso, consideram-se componentes de sequência positiva, como apresentado pela Equação 7, sendo \hat{V}_{R1} e \hat{V}_{G1} as respectivas tensões da barra local e da barra remota, \hat{I}_{R1} e \hat{I}_{G1} as respectivas correntes dos terminais da barra local e da barra remota de sequência negativa e Z_{L1} a impedância de sequência negativa da LT. Com isso, têm-se a Equação 7:

$$d = \frac{\hat{V}_{R1} - \hat{V}_{G1} + Z_{L1}\hat{I}_{G1}}{(\hat{I}_{R1} + \hat{I}_{G1})Z_{L1}}. \quad (7)$$

2.4 LOCALIZAÇÃO BASEADA NA TEORIA DE ONDAS VIAJANTES

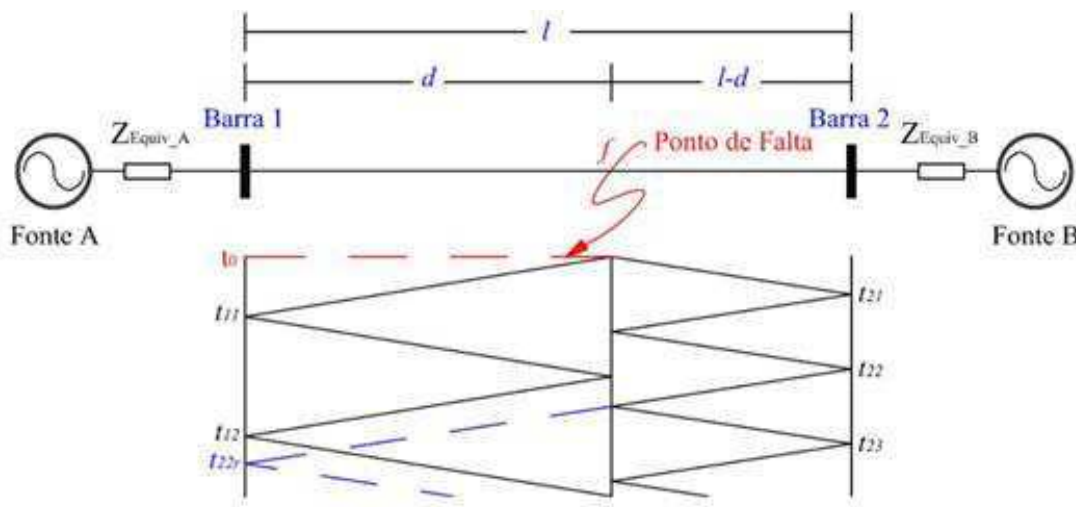
O princípio dos métodos baseados na teoria de ondas viajantes consiste em identificar o distúrbio por meio das componentes de tensão e/ou de corrente nos terminais monitorados da LT, levando em conta a velocidade de propagação das ondas segundo SAHA (2010).

Ultimamente, as concessionárias passaram a utilizar, largamente, estes métodos baseados em ondas viajantes com o intuito de identificar os locais das faltas com maior precisão e rapidez, acelerando o reestabelecimento do serviço e garantindo melhor

continuidade. No entanto, as altas taxas de amostragem exigidas por estas técnicas são o maior fator limitante, pois alguns problemas, como a distinção entre ondas refletidas e refratadas podem diminuir a precisão da estimação do ponto de falta por estes métodos (SAHA, 2010). Ademais, REIS (2015) também apresentou outro fator limitante da técnica, como o próprio desempenho dos Transformadores de Potencial Capacitivos (TPC).

Paralelo a este contexto, quando há uma falta na LT, os sinais transitórios de tensão e de corrente percorrem toda a extensão da linha até os terminais de monitoramento, propagando-se com velocidade, v_p , próxima à da luz e sofrendo reflexões e refrações até o completo amortecimento do transitório. Conforme a Figura 6, o ponto de falta é definido como ponto f , a extensão total da LT e a distância para o ponto de falta são l e d , respectivamente, tomando a Barra 1 como referência ou local. Ademais, t_{11} e t_{21} são os tempos de incidências das ondas viajantes na barra local e na barra remota, respectivamente.

Figura 6 – Diagrama de Reflexões para Faltas em Linhas de Transmissão.



Fonte: LOPES (2014).

Sabendo disso, GALE (1993) afirma que o local de falta pode ser estimado pela Equação 8, sendo, l , o comprimento total da LT, t_{11} e t_{21} os tempos de incidência, respectivamente, na barra local e na barra remota e, v_p a velocidade de propagação.

$$d = \frac{l + (t_{11} - t_{21})v_p}{2} \quad (8)$$

Atente para o fato que as variáveis t_{11} e t_{21} são obtidas por meio da transformada de Park que será mais detalhada e apresentada na seção 2.4.1 seguinte. Além disso, a velocidade de propagação, v_p , depende dos valores de indutância, L , e capacitância, C , de sequência positiva da LT, como apresentado pela Equação 9.

$$v_p = 1/\sqrt{L \cdot C}. \quad (9)$$

2.4.1 TRANSFORMADA DE PARK

Esta transformada, segundo LOPES (2014), tem sido aplicada na literatura principalmente em pesquisas relacionadas a máquinas síncronas de polos salientes. Isso se deve ao fato de, a partir de eixos referenciais estáticos, as indutâncias variantes no tempo sejam vistas de modo constante no domínio delimitado pelos eixos direto, quadratura e zero, conforme Figura 7.

Figura 7 – Diagrama de Reflexões para Faltas em Linhas de Transmissão.

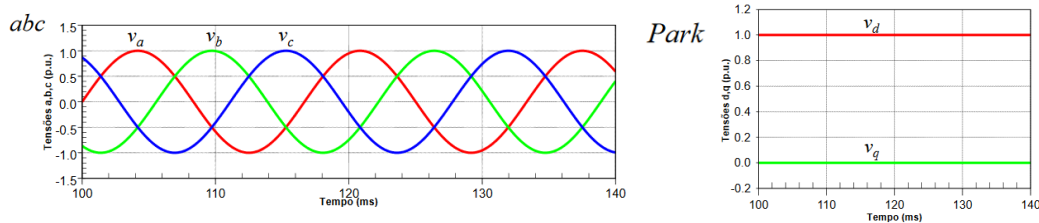


Fonte: LOPES (2014).

Outrossim, esta transformada apresenta-se bastante eficiente para o estudo de detecção de faltas. Isso é possível pois a transformada permite reproduzir as amostras de tensão em dois eixos que se apresentam constantes quando o sistema funciona em regime permanente e variam sensível e bruscamente quando submetido a um distúrbio. Na Figura 8 é apresentado o cenário em que o sistema funciona em regime e como são

apresentadas as amostras de tensão no domínio da transformada de Park. Deste modo, é apresentado um sistema com três fases a , b e c por unidade de tensão e sua respectiva transformada.

Figura 8 – Transformada de Park em Sistema Trifásico Equilibrado.



Fonte: LIMA (2015).

Por conseguinte, o objetivo da aplicação desta transformada se trata de obter os instantes de tempo de chegada das frentes de ondas viajantes nos terminais monitorados. Conforme apresentado na Equação 8, a estimação do local de falta depende de duas variáveis livres, t_{11} e t_{21} . A transformada de Park permite uma estimação precisa destes instantes. Segundo SOLIMAN (2006), isso é possível por intermédio de uma transformada que gera um eixo referencial girante sincronizado com os fasores de tensão e de corrente do SEP analisado, como apresentado na Equação 10, sendo V_a , V_b e V_c as amostras de tensão das fases a , b e c no instante k . Paralelamente, têm-se V_d e V_q que são, respectivamente, as amostras do eixo direto e de quadratura.

$$\begin{bmatrix} V_d(k) \\ V_q(k) \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega k) & \cos(\omega k - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega k - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\omega k) & -\sin(\omega k - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega k - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a(k) \\ V_b(k) \\ V_c(k) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Ademais, as componentes obtidas de eixo direto e de quadratura em regime permanente, apresentam valores constantes, enquanto que, durante um distúrbio no SEP, ocorrem grandes variações destes valores, permitindo a detecção e identificação dos transitórios. Ambos os eixos descritos e obtidos pela transformada, por girarem em sincronismo com a frequência fundamental do sistema, ω , apresentam variações mínimas.

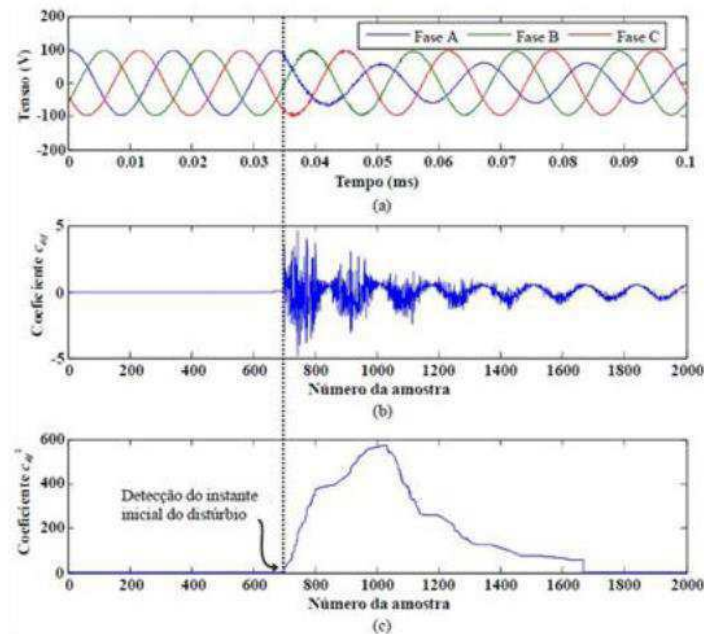
Consequentemente, por meio das componentes de eixo direto e de quadratura, é possível estimar o instante de distúrbio, como apresentado pela Equação 11. Sendo, V_d ,

a componente de eixo direto obtido da transformada de Park, Δt o passo de integração e c_{dif}^2 o quadrado do coeficiente de diferenças que visa maior sensibilidade do método.

$$c_{dif}^2 = \left(\frac{V_a(k) - V_a(k-1)}{\Delta t} \right)^2. \quad (11)$$

Na Figura 9, é apresentada a análise da detecção de faltas pela transformada de Park em um SEP no software ATP, utilizando um passo de integração de 5 μ s. Nesta figura, são apresentados os sinais de tensão trifásicos no domínio do tempo, os coeficientes da diferença, c_{dif} , e o quadrado dos coeficientes da diferença, c_{dif}^2 , sendo possível constatar o grau de sensibilidade do quadrado do coeficiente para detectar o instante inicial do distúrbio.

Figura 9 – Exemplo de detecção inicial de um distúrbio, utilizando Tdq0: (a) Sinais de tensão trifásicos; (b) Coeficientes c_{dif} ; (c) Coeficientes c_{dif}^2 .



Fonte: LOPES (2014).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados neste trabalho foram:

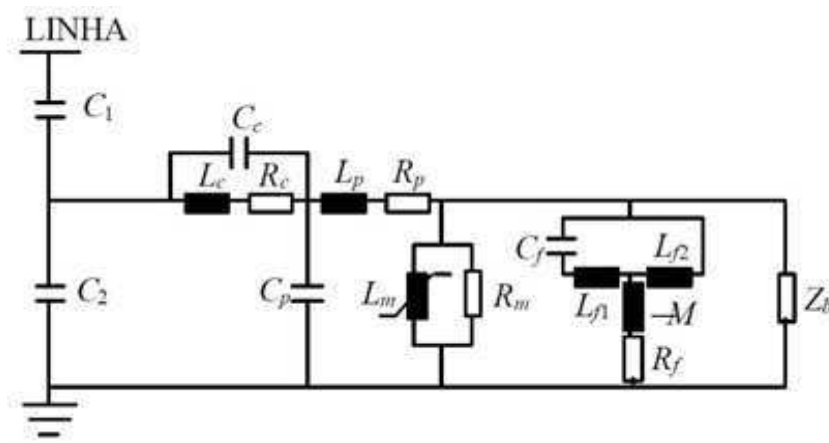
- *Alternative Transient Program* (ATP) versão 5.6 desenvolvido por NTNU e SINTEF *Energy Research*.
- Matlab versão 2015.a desenvolvido por *MathWorks*.

3.2 METODOLOGIA

Primeiramente, fez-se uma avaliação do estado da arte sobre detecção e localização de faltas em LT. Para isso, foi preciso compreender alguns elementos básicos de SEP, como o Transformador de Potencial Capacitivo (TPC), o Transformador de Corrente (TC) e as linhas de transmissão (LT).

Os fundamentos necessários para compreender os TC, como o desempenho, os circuitos equivalentes e a implementação no *software* ATP, foram apresentados por GUERRA (2007). REIS (2015), paralelamente, apresentou de modo bastante esclarecedor a importância de utilizar mais de um TPC para o estudo de sensibilidade, já que cada TPC pode apresentar respostas em frequência distintas o suficiente para alterar a detecção do ponto de falta. Os transformadores de potencial capacitivos utilizados neste trabalho são apresentados nas Figuras 10, 11 e 12.

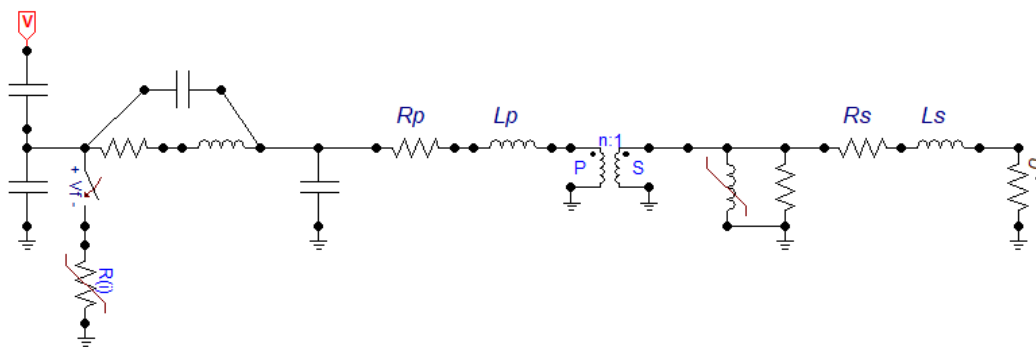
Figura 10 – Topologia do TPC 1.



Fonte: FERNANDES Jr. (2003).

Após conhecer a topologia do TPC 1, implementou-se no *software* ATP para viabilizar a reprodução dos sinais de tensão do barramento de 230 kV local e remoto do SEP. Com isso, na Figura 11, apresenta-se, o TPC 1 no ATP.

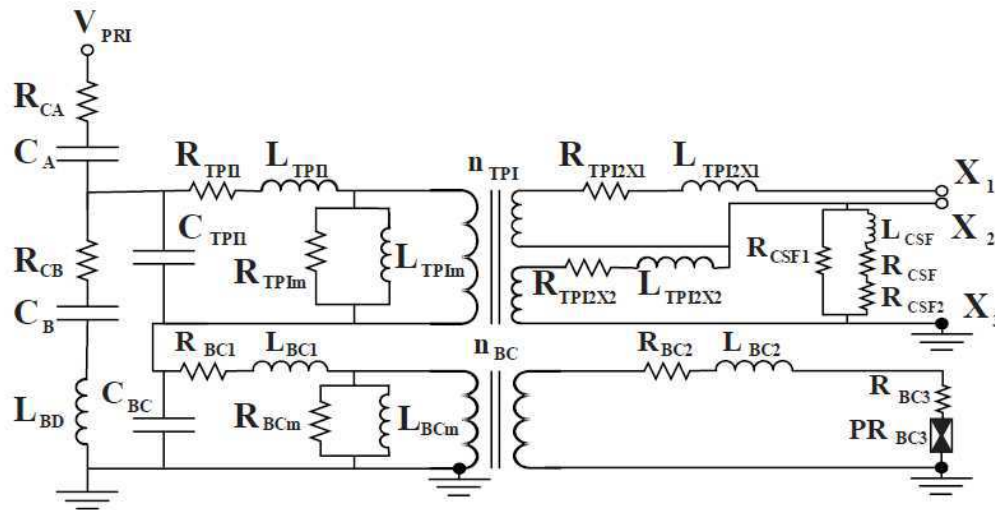
Figura 11 – Implementação do TPC 1 no ATP.



Fonte: Autoria própria.

O segundo modelo de TPC utilizado é mostrado na Figura 12.

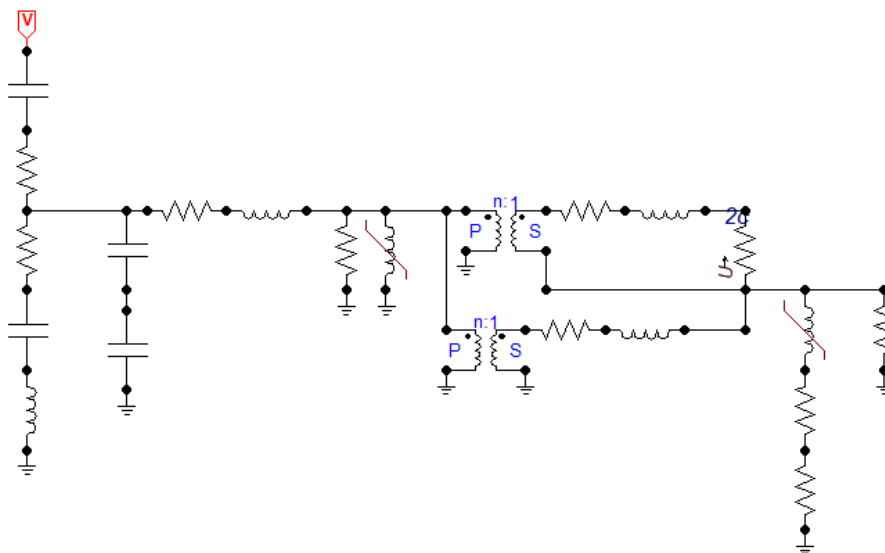
Figura 12 – Topologia do TPC 2.



Fonte: CARVALHO Jr. (2008).

Na Figura 13, por sua vez, é possível constatar a implementação da topologia do TPC 2 no ATP. É importante ressaltar que o sinal de tensão de interesse está entre os pontos X1 e X3 do TPC.

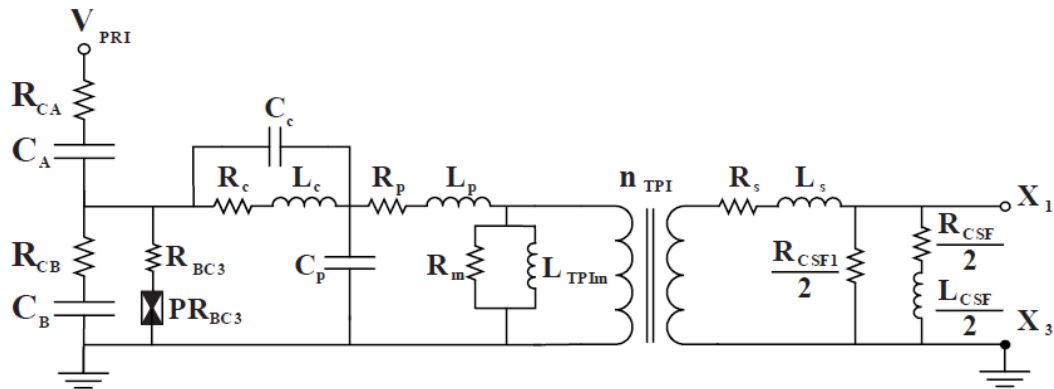
Figura 13 – Implementação do TPC 2 no ATP.



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 14, por conseguinte, é apresentado a topologia do TPC 3 utilizado nesta pesquisa.

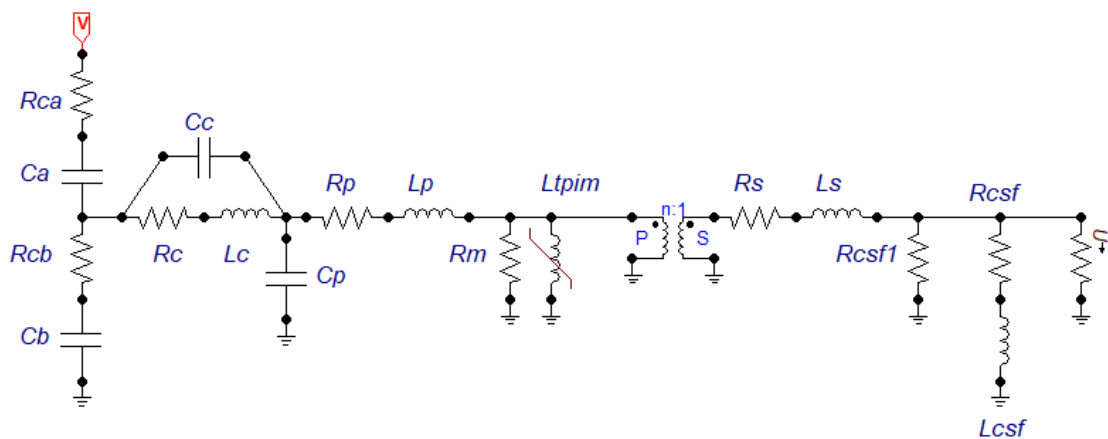
Figura 14 – Topologia do TPC 3.



Fonte: CARVALHO Jr. (2008).

Por fim, na Figura 15, apresenta-se a implementação do TPC 3 no ATP.

Figura 15 – Implementação do TPC 3 no ATP.



Fonte: Autoria própria.

Para obter os parâmetros dos TPC 1, 2 e 3, foram utilizados os trabalhos de FERNANDES Jr. (2003) e CARVALHO Jr. (2008). Ademais, ressalta-se que os parâmetros dos elementos não lineares, nas topologias apresentadas, também estão presentes nos trabalhos destes autores. Os parâmetros dos TPC 1, 2 e 3 utilizados são apresentados, detalhadamente, na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros dos TPC 1, 2 e 3 utilizados.

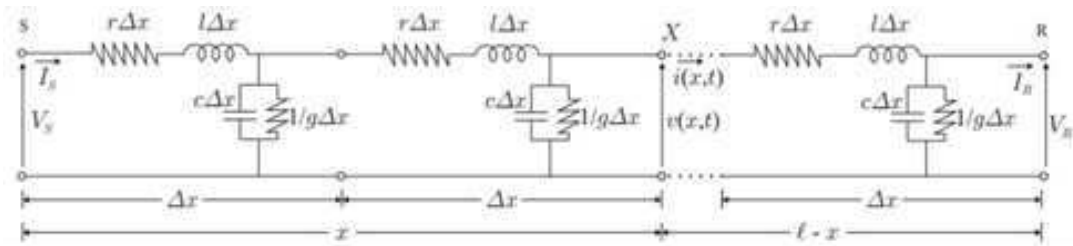
TPC 1		TPC 2		TPC 3	
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
C1 (nF)	10,4	CA (pF)	4321	CA (pF)	4050
C2 (nF)	65,4	CB (pF)	38820	CB (pF)	42138
Cc (nF)	493,2	CTPI1 (pF)	200	CP (pF)	149,7
Cp (nF)	9,3	CBC (pF)	1500	CC (pF)	144,78
Cf (nF)	166,39	LTPI1 (H)	6,93	LP (H)	4,68
Lc (H)	86,3	LTPI2X1 (mH)	0,0268	LS (mH)	0,143
Lp (H)	114,7	LTPI2X2 (mH)	0,0368	LC (H)	159,57
Lf1 (mH)	10,87	LBC1 (H)	1,32	LCSF (H)	0,354
Lf2 (mH)	47,39	LBC2 (mH)	3,56	RCA (Ω)	2469
M (mH)	-9,31	LBD (mH)	45	RCB (Ω)	243,6
Rc (k Ω)	9,1	RCA (Ω)	1565	RP (Ω)	446
Rp (Ω)	920	RCB (Ω)	177,	RS (m Ω)	48,5
Rm (Ω)	50,6	RTPI1 (Ω)	343	RC (Ω)	608
Rf (Ω)	4,99	RTPI2X1 (m Ω)	8,6	RBC3 (Ω)	68,8
nTPI (X1 - X3)	152,6	RTPI2X2 (m Ω)	11,8	Rm (Ω)	8,86
nTPI (X2 - X3)	152,6	RBC1 (Ω)	382	RCSF (Ω)	5,56
-	-	RBC2 (Ω)	5,64	RCSF1 (Ω)	186
-	-	RBC3 (Ω)	24,8	nTPI (X1– X3)	100,5
-	-	RCSF (Ω)	1,33	-	-
-	-	RCSF1 (Ω)	74,6	-	-
-	-	RCSF2 (Ω)	2,1	-	-
-	-	RTPIIm (M Ω)	11,2	-	-
-	-	RBC (M Ω)	1,26	-	-
-	-	nTPI (X1 – X3)	116,13	-	-
-	-	nTPI (X2 - X3)	201,1	-	-
-	-	nBC	19,23	-	-

Fonte: FERNANDES Jr. (2003); CARVALHO Jr. (2008).

Para o estudo de localização de faltas, foi adotada a representação das LT a parâmetros distribuídos, cuja representação é mostrada na Figura 16. Por meio deste modelo, é possível seccionar infinitesimalmente toda a extensão da LT, trazendo flexibilidade para definição dos pontos de falta em qualquer ponto desejado.

Na Figura 16, portanto, é possível constatar que a LT representada tem comprimento l e é composta por vários elementos incrementais de comprimento, Δx , de uma LT, sendo r , l e c , respectivamente, resistência série, indutância série e capacitância em derivação por unidade de comprimento. Ademais, o ponto X é o local de falta em relação ao terminal S .

Figura 16 – Representação de LT a parâmetros distribuídos.



Fonte: LOPES (2014).

É necessário destacar que o modelo de LT adotado neste trabalho foi o de Bergeron, que apresenta as indutâncias e capacitâncias de uma seção PI de forma distribuída, ou seja, o modelo pode ser apresentado como um número infinitesimal de seções PI com exceção das resistências que são consideradas elementos concentrados (CABALLERO, 2018). Este modelo, que foi implementado no ATP, é bastante eficiente para simular faltas, pois é possível segmentar toda a extensão da linha em elementos infinitesimais, permitindo que o local da falta pudesse ser, previamente, definido. Na Figura 17 é apresentado o elemento usado no ATP para representar a LT a parâmetros distribuídos. É necessário dividir a linha em duas unidades para que entre os dois blocos seja inserido o ponto de falta. Deste modo, a soma do comprimento dos dois blocos, LT e LTc, deve ser sempre igual ao comprimento total da LT. Ressaltando que, caso o ponto de falta desejado fosse estritamente próximo à extremidade da LT, o comprimento de LT não poderia assumir o valor zero. No ATP não é permitido que este bloco possua comprimento com este valor.

Figura 17 – Implementação da LT no ATP.



Fonte: Autoria própria.

A tensão de operação da linha de transmissão, os valores de impedância para cada domínio de sequência e o comprimento total da LT são apresentados na Tabela 2.

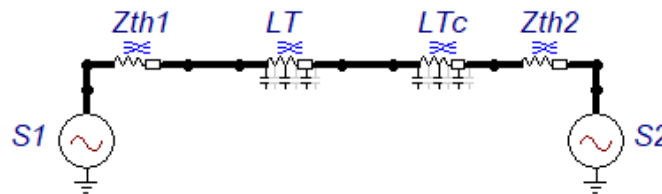
Tabela 2 – Parâmetros da linha de transmissão.

Tensão	Componente	R	X	ωC	l
	de Sequência	(Ω/km)	(Ω/km)	($\mu\Omega/\text{km}$)	(km)
230 kV	Positiva	0,0980	0,5100	3,2520	200
	Zero	0,5320	1,5320	2,2930	

Fonte: REIS (2015).

O último conjunto de elementos implementados no ATP é constituído de dois equivalentes de Thévenin. Estes equivalentes representam as duas subestações, local e remota, do SEP de 230 kV (Figura 18).

Figura 18 – Implementação do SEP de 230 kV no ATP.



Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros dos dois equivalentes utilizados neste trabalho.

Tabela 3 – Parâmetros dos Equivalentes 1 e 2 de Thévenin.

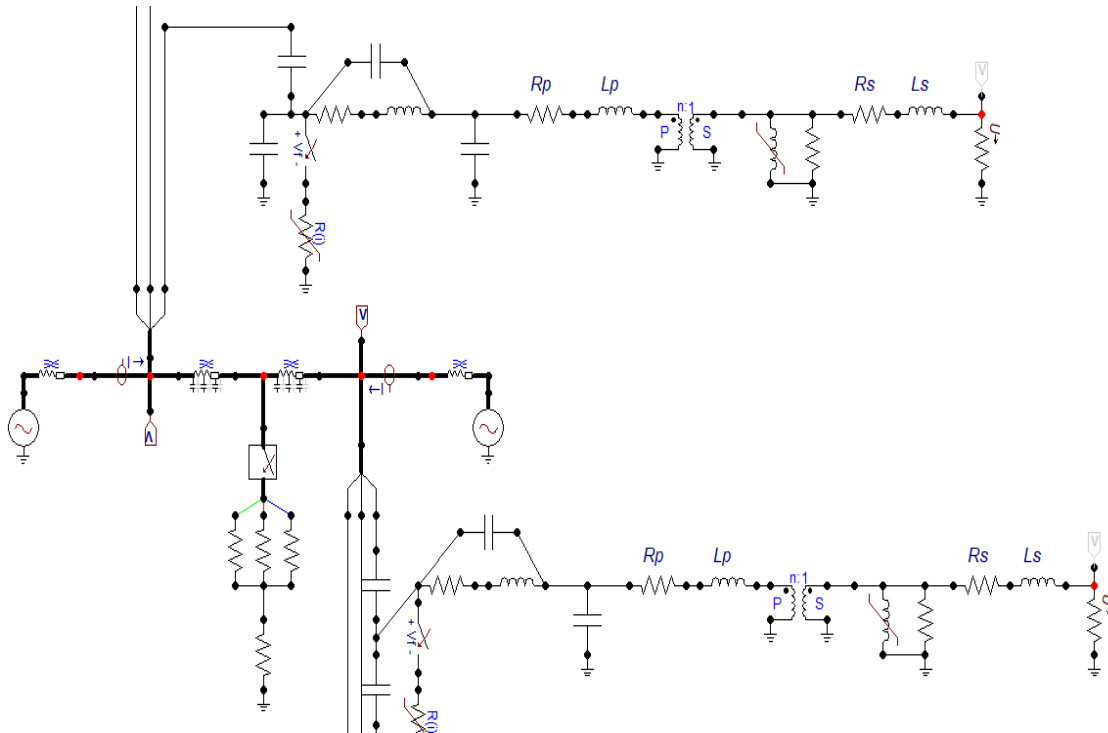
Tensão (kV)	Fonte	V_{th} (pu)	Z_{th} ($Z1$ e $Z2$)			
			$R1(\Omega)$	$X1(\Omega)$	$R0(\Omega)$	$X0(\Omega)$
230	S1	$1,02\angle 0^\circ$	0,8713	25,661	1,0141	18,754
	S2	$0,98\angle -10^\circ$	0,9681	28,513	1,1268	20,838

Fonte: REIS (2015).

O cenário completo, considerando o TPC 1, é apresentado na Figura 19. Nessa figura, é possível constatar como foi implementada a falta no ATP. A chave localizada na LT é utilizada para selecionar o tipo de falta, como falta monofásica, bifásica, bifásica para terra e trifásica. Os resistores em série com a chave determinam o valor da

impedância de curto-circuito. Por meio do resistor R_{cc} , é possível definir se a falta envolve ou não o terra.

Figura 19 – Implementação da LT no ATP.



Fonte: Autoria própria.

Por fim, foram definidas e padronizadas as constantes de simulação. Todas as simulações ocorreram com taxa de amostragem de 200 kHz e tempo de execução de 160 ms. Adotaram-se estes valores para evitar que a taxa de amostragem interferisse, segundo LOPES (2014), nas análises dos métodos frente à variação dos parâmetros descritos a seguir. Paralelamente, foram instanciadas as variáveis que determinam o ponto exato, o ângulo de incidência e o valor de impedância de falta. Com isso, foi possível variar todas as grandezas que permitissem alcançar os objetivos da pesquisa. A seguir, na Tabela 4, apresentam-se todas as combinações possíveis e analisadas neste trabalho.

Tabela 4 – Variáveis analisadas.

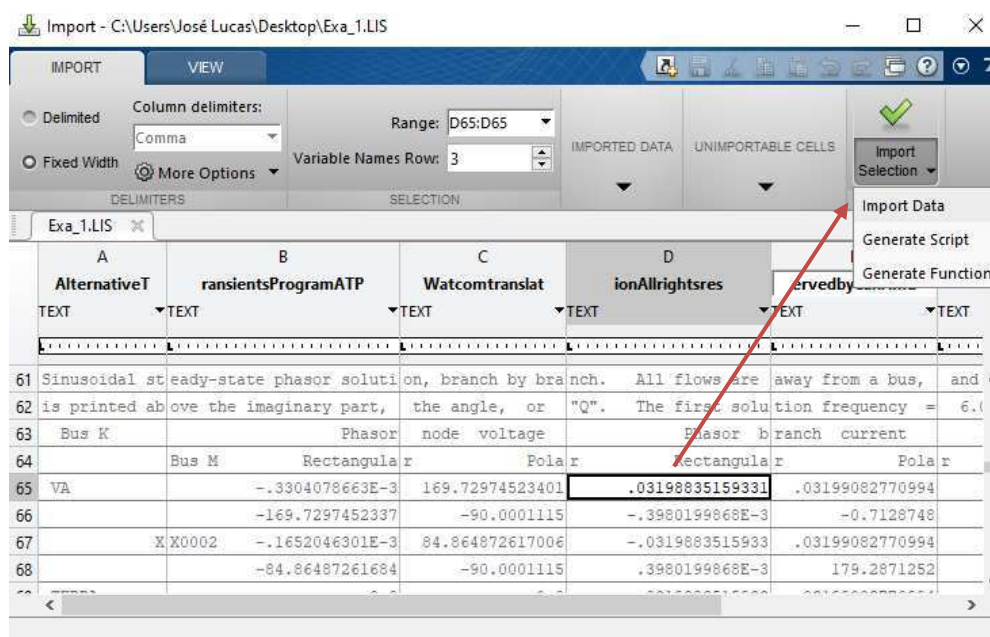
TIPO DE FALTA	IMPEDÂNCIA DE FALTA	ÂNGULO DE INCIDÊNCIA	TPC	TAXA DE AMOSTRAGEM
Fase-Terra, Fase-Fase, Fase-Fase-Terra ou Trifásica	0,50 ou 100 Ω	0°, 30°, 60° ou 90°	TPC 1, TPC 2 ou TPC 3	1 MHz, 200 kHz e 20 kHz

Fonte: Autoria própria.

Para viabilizar todos os cálculos de estimação dos pontos de falta, fez-se uso do Matlab para importar todos os resultados. A cada simulação, o ATP gera um arquivo no formato LIS. Com este arquivo, é possível extrair todos os fasores de tensão e de corrente do circuito, permitindo assim realizar todos os cálculos dos métodos de componentes fundamentais de um e de dois terminais.

Na Figura 20, é possível observar como o MATLAB permite importar os dados existentes em um arquivo em formato LIS.

Figura 20 – Ferramenta *ImportData* do MATLAB.



Fonte: Autoria própria.

Por meio desta ferramenta, é possível selecionar os dados necessários para implementar nos métodos baseados em componentes fundamentais. Isto é feito importando e atribuindo as variáveis selecionadas às variáveis do algoritmo de detecção de faltas. Paralelamente, o método baseado em ondas viajantes de 2 terminais demanda as amostras de tensão no domínio do tempo. Devido a isso, o ATP permite exportar tabelas com todas as amostras por meio de arquivo com formato LIS, viabilizando o cálculo da transformada de Park e a estimação do local de falta por meio do método. É importante destacar que foram feitas todas as simulações inicialmente, implementando manualmente todos os parâmetros necessários e obtendo todas as fontes de dados em formato LIS exportado do ATP. Em seguida, com o Matlab, foi possível obter os parâmetros necessários, usando a função *importdata*.

Após a importação dos dados do ATP para o Matlab, montou-se um banco de dados com todas as variáveis para poupar tempo de processamento e de desenvolvimento. Por conseguinte, foram implementados os métodos baseados em componentes fundamentais e de ondas viajantes. Por fim, calculou-se o erro com base na Equação 12, sendo l o comprimento da LT, d a distância definida em cada simulação do ATP e \tilde{d} o valor estimado com base em cada método avaliado nesta pesquisa.

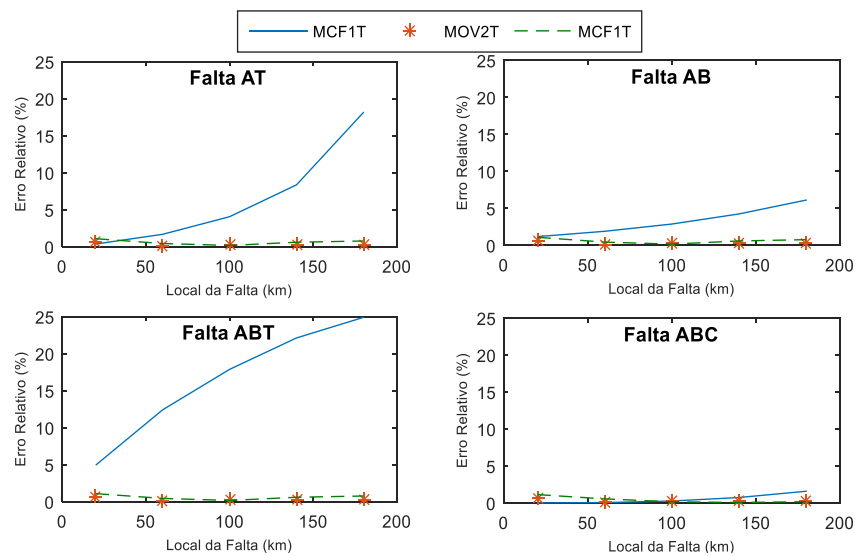
$$\varepsilon(\%) = \frac{|d - \tilde{d}|}{l} \cdot 100. \quad (12)$$

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

As 605 simulações foram realizadas por meio da variação do tipo de falta, do valor de resistência de falta, do ângulo de incidência da falta, do tipo de TPC e da taxa de amostragem do SEP. Deste modo, buscou-se, a cada simulação, detectar situações em que a característica de falta impactasse no desempenho dos métodos analisados. É importante destacar que todos os ângulos apresentados neste capítulo foram ajustados para a referência Senoidal.

Inicialmente, a análise foi feita com base nas configurações de falta. Para isso, fixou-se a resistência de falta em 1Ω e o ângulo de incidência em 90° em relação à referência senoidal, variando-se apenas as fases envolvidas no curto-circuito. Neste cenário, destacam-se que os fasores foram obtidos no ATP após 10 ciclos em relação ao instante de ocorrência do defeito. Na Figura 21, por conseguinte, é possível constatar a relação do impacto do tipo de falta frente ao desempenho dos métodos avaliados para componentes fundamentais de um terminal (MCF1T), para componentes fundamentais de dois terminais (MCF2T) e para componentes de alta frequência com base no método de ondas viajantes de dois terminais (MOV2T).

Figura 21 – Influência do tipo de falta sobre os métodos avaliados.

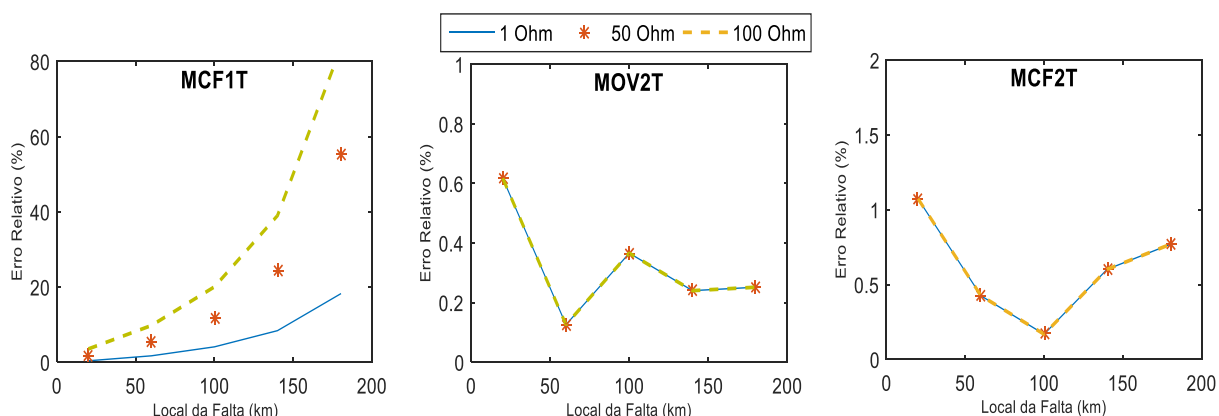


Fonte: Autoria própria.

Diante disso, para o MCF1T, as faltas avaliadas que não envolvem o contato com o terra apresentaram erros máximos de 5%, mas as faltas fase-terra e fase-fase-terra tiveram erros máximos de 20% e 25%, respectivamente. É interessante ressaltar que os erros, para o método de componentes fundamentais de um terminal, são crescentes com a distância do local de falta em relação ao terminal monitorado. Isso ocorre devido ao maior efeito capacitivo da LT, fazendo com que a impedância aparente calculada pelo algoritmo da Equação 3 apresente maior erro. Paralelamente, os métodos de ondas viajantes e de componentes fundamentais de dois terminais apresentaram significativa robustez frente às variações dos tipos de faltas analisadas, apresentando erro máximo de 1,2%.

Com relação aos impactos causados pela resistência de falta, considerou-se o ângulo de incidência fixo em 90° , em relação à referência senoidal, para falta fase-terra. Na Figura 22, por sua vez, é possível constatar que os valores de resistência de falta afetam significativamente o método de reatância simples de um terminal. Isso ocorre, porque a impedância aparente é influenciada pelo aumento da impedância de falta. Além disso, é constatado novamente que a distância da falta em relação à barra local monitorada afeta diretamente o crescimento do erro relativo. Por outro lado, o método baseado em componentes fundamentais de dois terminais mostrou-se imune à variação da resistência de falta, bem como o método de ondas viajantes de dois terminais, evidenciando a importância e a robustez dos métodos de dois terminais.

Figura 22 – Influência da resistência de falta sobre os métodos avaliados.



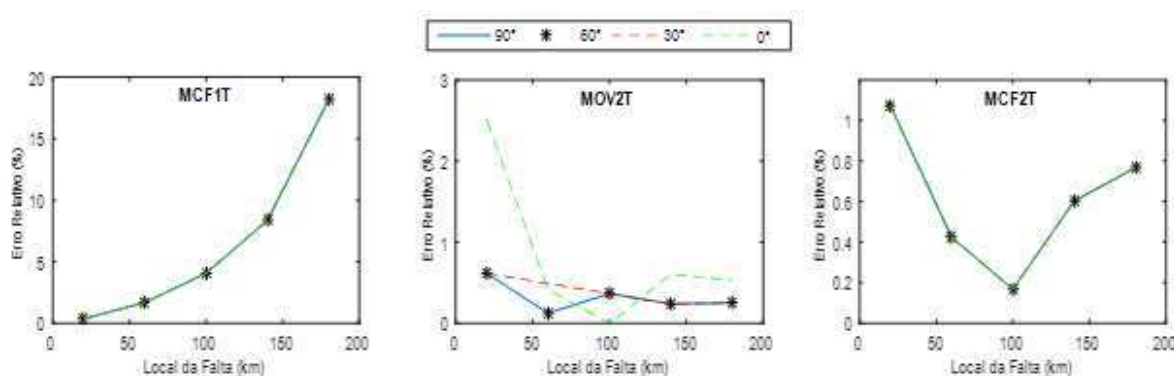
Fonte: Autoria própria.

Ademais, na Figura 23, são apresentados os impactos dos métodos frente à variação do ângulo de incidência de falta quando a resistência de falta é de 1Ω para

falta fase-terra. Nesta figura, é possível constatar que o método de componentes fundamentais de um terminal não sofreu qualquer variação diante da mudança do ângulo de incidência, bem como o método de dois terminais, sendo o método de dois terminais mais robusto e mais eficiente que o método de um terminal nesta perspectiva.

Paralelo a estas análises, as rotinas que apresentaram variações no desempenho foram as baseadas em ondas viajantes, destacando-se o ângulo de 0° em relação à referência senoidal de tensão. Isso se deve ao ângulo de incidência, da resposta em frequência e da dinâmica do próprio TPC 1 utilizado. Esta constatação será confirmada com a verificação dos mesmos métodos com diferentes TPC na Figura 24. Além disso, para o método baseado em ondas viajantes, os melhores resultados foram obtidos quando o ângulo de incidência foi de 90° , ou seja, próximo do pico de tensão em relação à referência senoidal, facilitando a detecção dos instantes de chegada das ondas viajantes devido à maior evidência dos transitórios nos terminais monitorados da LT.

Figura 23 – Influência do ângulo de incidência de falta sobre os métodos avaliados.



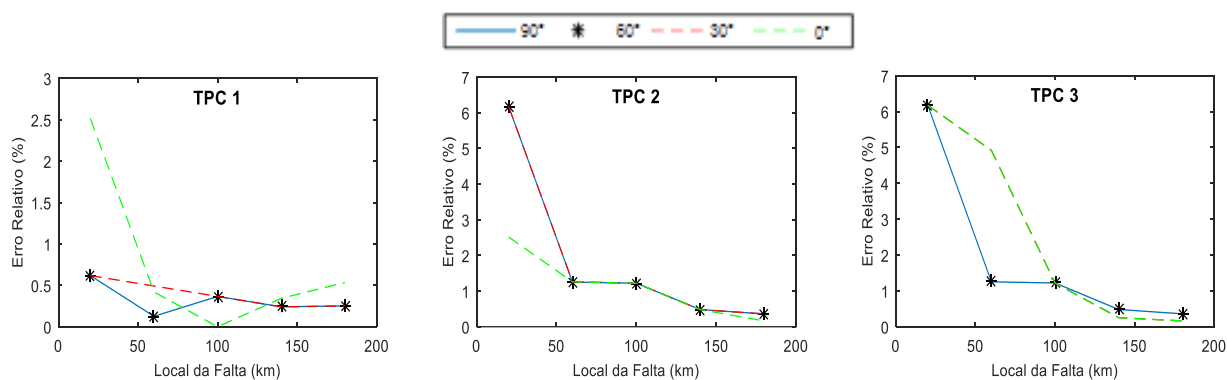
Fonte: Autoria própria.

Na penúltima análise, são apresentados, na Figura 24, os impactos dos métodos frente à variação do ângulo de incidência de falta quando a resistência de falta é de 1Ω para falta fase-terra, utilizando os TPC 1, 2 e 3. Com isso, é possível constatar que tanto variações no ângulo de incidência quanto no modelo de TPC adotado proporcionaram impactos no método de ondas viajantes de dois terminais. Ademais, mesmo com os erros obtidos por meio dos TPC 2 e 3 sendo superiores a 6% enquanto para o TPC 1 foi de apenas 2,5%, o tratamento das amostras de tensão do TPC 1 foi bastante complexo devido ao seu baixo ganho para as componentes de alta frequência, pois os modelos de TPC 2 e 3 apresentam elevados ganhos das componentes de alta frequência, facilitando a estimação do ponto de falta por meio da transformada de Park. No entanto, ainda que

os ganhos em alta frequência dos TPC 2 e 3 sejam superiores ao TPC 1, os erros também foram superiores aos obtidos pelo TPC 1, constatando-se que esta é uma condição necessária, mas não suficiente para obter uma maior eficácia do método.

Além disso, como o intuito deste trabalho é avaliar os maiores impactos sensibilizados pelos métodos, foi apresentada apenas a influência da variação do ângulo de incidência de falta sobre o MOV2T, já que o MCF1T e o MCF2T utilizam os fasores para estimar os locais de falta. Deste modo, o impacto sobre os métodos baseados em componentes fundamentais foi praticamente imperceptível quando comparando aos métodos baseados em ondas viajantes.

Figura 24 – Influência do ângulo de incidência de falta sobre o MOV2T.



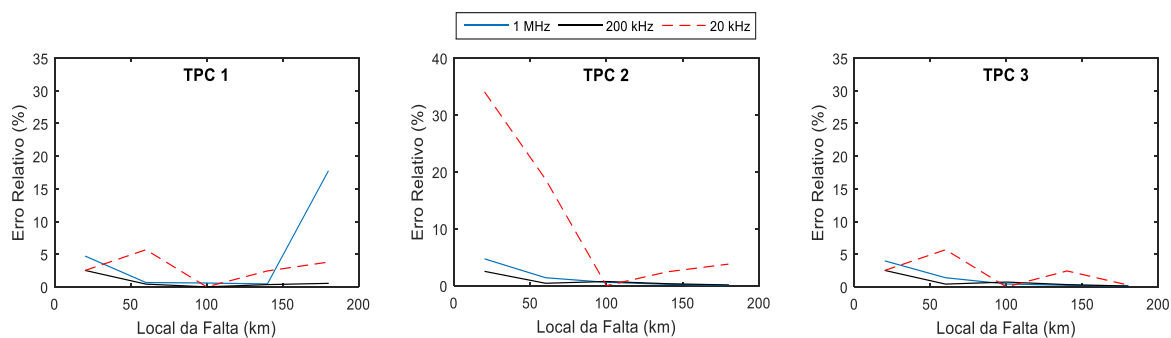
Fonte: Autoria própria.

Por fim, são apresentados, na Figura 25, os impactos sobre o método de ondas viajantes de dois terminais frente à variação da taxa de amostragem quando o ângulo de incidência é fixo em 90° e a resistência de falta é de 1Ω para falta fase-terra, utilizando os TPC 1, 2 e 3. Esta análise é feita especificamente para o método de ondas viajantes, porque a transformada de Park será diretamente afetada, como apresentado na Equação 10. Com base na Figura 25 percebe-se, de fato, que o método é afetado pela variação da frequência de amostragem. Neste cenário, constatou-se que, quanto menor a frequência de amostragem, mais susceptível a erros o método está. Ademais, vale ressaltar que se utilizou, especificamente, o ângulo de incidência de 90° devido à elevada quantidade de componentes de alta frequência durante o defeito no SEP para que, assim, fosse melhor implementado o método de ondas viajantes no processo de estimação do local de falta.

Além disso, vale destacar que, para o TPC 1, a frequência de amostragem de 1 MHz levou a erros de 20% quando o local de falta foi superior a 150 km. Isso se deve

ao desempenho dinâmico e conjunto do SEP com o TPC 1 utilizado, ou seja, a partir dos 150 km do terminal local monitorado, as frequências amostradas são capazes de reduzir a eficácia do método, pois a resposta em frequência do TPC 1 interfere na eficácia do MOV2T.

Figura 25 – Influência da taxa de amostragem sobre o MOV2T.



Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, realizou-se uma análise de sensibilidade levando em consideração alguns fatores do Sistema Elétrico de Potência capazes de influenciar o desempenho de métodos de localização de faltas, como o valor da resistência de falta, o ângulo de incidência, o tipo de falta, o desempenho dos TPC e a taxa de amostragem.

A partir das técnicas de localização de faltas reportadas na literatura, os pontos dos distúrbios foram estimados, sendo duas técnicas baseadas em componentes fundamentais e uma baseada na teoria de ondas viajantes.

No que se refere aos métodos baseados em componentes fundamentais, constatou-se que os algoritmos de um terminal são afetados pela resistência de falta e pela distância com relação à barra local de referência. Por outro lado, para a técnica de dois terminais, foi constatado que ela se apresenta imune às características de falta. No entanto, seu desempenho foi alterado apenas quando houve variação do tipo de falta.

Em relação às técnicas baseadas na teoria de ondas viajantes, o maior fator limitante é o desempenho do TPC, visto que, se o mesmo atenuar as componentes de alta frequência, o método poderá ter seu desempenho reduzido, como foi constatado no TPC 1, durante o desenvolvimento da pesquisa.

Por conseguinte, constatou-se que o desempenho dos algoritmos frente à taxa de amostragem utilizada pelos conversores A/D apresenta melhor desempenho quanto maior for a frequência de amostragem. Ao reduzir drasticamente a frequência de amostragem dos conversores, torna-se complexo analisar as frentes de ondas viajantes aplicando a transformada de Park, pois o sinal fica completamente distorcido, elevando, conseqüentemente, o erro de estimação do local de falta.

Diante disso, sugere-se como atividades para trabalhos futuros:

- Avaliar o desempenho dos métodos em um sistema com maior quantidade de linhas de transmissão e de barras.
- Avaliar o desempenho de mais métodos de localização de faltas frente à resposta em frequência dos TPC.
- Avaliar o desempenho dos métodos para outros níveis de tensão.

REFERÊNCIAS

- DAS, S.; SANTOSO, S.; GAIKWAD, A.; PATEL, M. **Impedance-based Fault Location in Transmission Networks: Theory and Application**. *IEEE Access*, v. 2, p. 537–557, 2014. ISSN 2169-3536.
- CABALLERO, P. T. **Inclusion of the Frequency Dependence in the Bergeron Model: Representation of Short and Long Transmission Lines Considering Electromagnetic Transients Resulting from Switching Operations and Lightning Strikes**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP. Ilha Solteira, 2018.
- CARVALHO Jr., A. V. **Interação Transitória entre Transformadores de Potencial Capacitivos e Linhas de Transmissão: Uma Contribuição para Minimizar Falhas**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil, agosto 2008.
- FERNANDES Jr., D. **Modelo de Transformadores de Potencial Capacitivos para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, dezembro de 2003.
- GALE, P.; CROSSLEY, P.; BINGYIN, X.; YAOZHONG, G.; CORY, B.; BARKER, J. **Fault Location Based on Travelling Waves**. In: *Fifth International Conference on Developments in Power System Protection*. [S.l.: s.n.], 1993. P. 54-59.
- GUERRA, F.; MOTA, W. **Current Transformer Model**. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. *IEEE Access*, v. 1, p. 187 – 194, jan. 2007. ISSN 0885-8977.
- LIMA, K. **Transformada de Clarke e Park**. Centro de Tecnologia Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Aplicações de Eletrônica de Potência em Sistemas de Potência. Departamento de Engenharia Elétrica. Ceará, v. 6. 2015.
- LOPES, F. V. **Localização de Faltas em Tempo Real Baseada na Teoria de Ondas Viajantes Usando Dados Não Sincronizados de Dois Terminais**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, maio de 2014.
- ONS. **Operador Nacional do Sistema Elétrico**. 2020. Página Inicial. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/>>. Acesso em: 08 de março de 2020.
- REIS, R. L. A. **Influência de Transformadores de Potencial Capacitivos e Filtros Anti-Aliasing Sobre Métodos de Localização de Faltas Baseados na Teoria de Ondas Viajantes**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, PB, julho de 2015.

SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J.; ROSOLOWSKI, E. **Fault Location on Power Networks**. London: Ed. Springer, 2010. (Power Systems). ISBN 978-1-84882-885-8.

SOLIMAN, S.; BELKHAYAT, M. **Power Systems Fault Type Identification Based on Park's Transformation Algorithm**. In: 2006 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering. [S.l.: s.n.], 2006. p. 141 –145.

SUTHERLAND, P. E. **Principles of Electrical Safety**. John Wiley & Sons, Inc., First Edition, 2015.

TAKAGI, T.; YAMAKOSHI, Y.; YAMAURA, M.; KONDOW, R.; MATSUSHIMA, T. **Development of a New Type Fault Locator using the One-terminal Voltage and Current Data**. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101, n. 8, p. 2892–2898, aug. 1982. ISSN 0018-9510.