



**Universidade Federal de Campina Grande**

**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

HARRISON BATISTA DE LIMA

**COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE  
FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO  
SÉRIE CAPACITIVA**

Campina Grande, Paraíba  
Outubro de 2016

HARRISON BATISTA DE LIMA

COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE  
FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO  
SÉRIE CAPACITIVA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação de Graduação em Engenharia  
Elétrica da Universidade Federal de Campina  
Grande como parte dos requisitos necessários  
para a obtenção do grau de Bacharel em  
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Processamento de Energia

Orientador:

Professor Damásio Fernandes Júnior, D.Sc.

Campina Grande, Paraíba  
Outubro de 2016

HARRISON BATISTA DE LIMA

COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE LOCALIZAÇÃO DE  
FALTAS EM LINHAS DE TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO  
SÉRIE CAPACITIVA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação de Graduação em Engenharia  
Elétrica da Universidade Federal de Campina  
Grande como parte dos requisitos necessários  
para a obtenção do grau de Bacharel em  
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

Aprovado em        /        /

**Professor Avaliador**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

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

Dedico este trabalho à minha fielnamorada, Camila Rachel Lira Silva, que sempre me apoiou em todos os momentos da minha vida. Dedico também aos meus pais, Gizelda Batista de Lima e Emanuel Batista Silva, por sempre terem me dado suporte e com quem sempre pude contar em todos os momentos.

## AGRADECIMENTOS

Ainda que num contexto em que ciência e fé parecem tão distantes, inicio expressando minha gratidão a Deus. Faço isso consciente de que a dimensão da espiritualidade, mais que restrita a um âmbito privado de nossas vidas, faz parte da nossa integralidade enquanto indivíduos.

Agradeço a essa Instituição pela minha acolhida e pelas condições oferecidas, que me permitiram concluir este trabalho.

Agradeço também à minha mãe, Gizelda Batista de Lima, a meu pai, Emanuel Batista Silva, por terem se esforçado tanto para me proporcionar uma boa educação, por terem me propiciados todos os princípios e ferramentas para que eu pudesse iniciar, cursar e concluir esta graduação.

Agradeço a minha namorada, Camila Rachel Lira Silva, que me deu todo apoio e incentivo desde que eu comecei o curso.

Agradeço também a toda minha família, que com todo carinho e apoio, não mediu esforços para eu chegar a esta etapa da minha vida, em especial aos meus irmãos Ruann Emanuel Batista de Lima e Robson Kel Batista de Lima.

Agradeço ao meu orientador, Damásio Fernandes Júnior, pela paciência, pelo tempo dedicado às sugestões, por ter desde meu primeiro período na universidade me mostrado o real sentido de se trabalhar com excelência e dedicação, sempre me auxiliando e incentivando nas mais diversas áreas da minha vida profissional, sobretudo nos estudos e produções científicas.

Agradeço aos meus colegas de curso com quem sempre tive contato e trabalhei em equipe, sobretudo a Arthur Francisco Andrade, com quem sempre pude contar não só como colega, mas como amigo que levarei para a vida toda.

Agradeço aos meus colegas de pesquisa do Grupo de Sistemas Elétricos, principalmente aos do Laboratório de Sistemas de Potência por todo auxílio nas horas que precisei, em especial a William Pinheiro Silva e Yonatha Marques Pereira de Melo por todo auxílio em minhas pesquisas e dedicação em compartilhar atividades de pesquisa.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

*“Se você quer transformar o mundo, experimente primeiro promover o seu aperfeiçoamento pessoal e realizar inovações no seu próprio interior.”*

Dalai Lama.

## RESUMO

As linhas de transmissão (LT) possibilitam a interligação da geração de energia elétrica até o seu destino final, portanto estudos que tenham como objetivo a continuidade desta transmissão têm importância fundamental. Atualmente, pode ser encontrada na literatura uma vasta gama de técnicas que permitem a localização de faltas em linhas de transmissão a partir de diferentes análises e conceitos, cada uma com as suas respectivas potencialidades e limitações. Utilizando métodos tradicionais encontrados na literatura, tais como métodos baseados na teoria das ondas viajantes e métodos baseados na análise dos componentes de frequência fundamental, foi realizada uma análise comparativa identificando os pontos positivos e negativos de cada técnica. Para validação da comparação entre os métodos, tendo como ferramentas a linguagem MODELS do ATP (*Alternative Transients Program*) e o MATLAB<sup>®</sup>, foram realizadas simulações de faltas para identificar em quais situações cada método se mostra mais conveniente e em quais situações sua utilização deve ser evitada. Foi realizada ainda uma análise, para validação dos métodos, da influência da compensação série capacitiva na linha de transmissão, utilizando-se dados de uma linha real.

**Palavras-chave:**Localização de faltas; simulação de faltas em LT; compensação série capacitiva; transitórios eletromagnéticos.

## ABSTRACT

Transmission lines (TL) enable the interconnection of electricity generation to its final destination, so studies that aim to continue this transmission are of fundamental importance. Currently, it can be found in the literature a wide range of techniques that allow the location of faults in transmission lines from different analysis and concepts, each one with their respective capabilities and limitations. Using traditional methods found in the literature, such as methods based on the traveling waves theory and methods based on the analysis of the fundamental frequency components, a comparative analysis was performed to identify the positive and negative aspects of each technique. To validate the comparison between the methods, using the MODELS language of the ATP (Alternative Transients Program) and MATLAB<sup>®</sup>, fault simulations were performed to identify in which situations each method has been shown to be more convenient and in what situations its use should be avoided. Moreover, an analysis of the influence of capacitive series compensation in the transmission line was performed, using data from a real transmission line.

**Keywords:**Fault location; fault simulation in TL; capacitive series compensation;electromagnetic transients.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagramas de reflexões para faltas em linhas de transmissão. ....	21
Figura 2– Linha de transmissão monitorada em dois terminais. ....	23
Figura 3 – Representação unifilar da LT com falta. ....	25
Figura 4 – Resposta em frequência dos filtros Butterworth projetados: (a) Ganho; (b) Fase. ....	28
Figura 5 – Exemplo de esquema de janelamento. ....	29
Figura 6 – Resposta em frequência dos módulos dos filtros digitais de Fourier de um ciclo. ....	33
Figura 7 – Resposta em frequência dos módulos dos filtros digitais de Fourier de um ciclo. ....	33
Figura 8 – Resposta no tempo do algoritmo de Fourier de um ciclo: (a) Tensão; (b) Corrente. ....	34
Figura 9 – Resposta em frequência dos módulos dos filtros digitais de Fourier de um ciclo. ....	35
Figura 10 – Resposta no tempo do algoritmo de Fourier de um ciclo: (a) Tensão; (b) Corrente. ....	36
Figura 11 – Detecção de transitórios em um registro oscilográfico real via Tdq0: (a) Sinal trifásico de tensão; (b) Tensão de eixo direto Vd; (c) Coeficientes cdif; (d) Energia $\xi_{dif}$ dos coeficientes cdif. ....	38
Figura 12 – Determinação do fator de sensibilidade <i>fsb</i> . ....	39
Figura 13 – Detecção de transitórios: (a) Sinal trifásico de tensão; (b) Energia $\xi_{dif}$ dos coeficientes <i>cdif</i> . ....	40
Figura 14 – Diagrama unifilar da linha de transmissão de 230 kV, LT FICT, entre as subestações SE B1 e SE B2. ....	46
Figura 15 – Diagrama unifilar de parte do SIN referente ao SEP no qual se encontra instalada a linha de 230 kV, LT 04M2, entre as subestações Milagres (SE MLG) e Banabuiú (SE BNB) ....	46
Figura 16 – Análise da influência de imprecisões nos parâmetros de sequência zero ( $Z_{L0}$ ) da LT: (a) LOPES (2011b); (b) GIRGIS <i>et al.</i> (1992); (c) JOHNS & JAMALI (1990). ....	47
Figura 17 – Análise da influência de imprecisões nos parâmetros de sequência positiva ( $Z_{L1}$ ) da LT: (a) LOPES (2011b); (b) GIRGIS <i>et al.</i> (1992); (c) JOHNS & JAMALI (1990). ....	48
Figura 18 – Análise da influência de imprecisões no comprimento L da LT: (a) LOPES (2011b); (b) GIRGIS <i>et al.</i> (1992); (c) JOHNS & JAMALI (1990). ....	49
Figura 19 – Análise da influência da resistência de falta: (a) LOPES (2011b); (b) GIRGIS <i>et al.</i> (1992); (c) JOHNS & JAMALI (1990). ....	50
Figura 20 – Análise da influência do tipo de falta: (a) AT; (b) BT; (c) CT; (d) AB; (e) BC; (f) AC; (g) ABT; (h) BCT; (i) ACT; (j) ABC. ....	51
Figura 21 – Análise da influência do ângulo de incidência da falta: (a) LOPES (2011b); (b) GIRGIS <i>et al.</i> (1992); (c) JOHNS & JAMALI (1990). ....	52
Figura 22 – Análise da compensação série capacitiva instalada em 1 terminal da LT: (a) LOPES (2011b); (b) GIRGIS <i>et al.</i> (1992); (c) JOHNS & JAMALI (1990). ....	54
Figura 23 – Análise da compensação série capacitiva instalada em 2 terminais da LT: (a) LOPES (2011b); (b) GIRGIS <i>et al.</i> (1992); (c) JOHNS & JAMALI (1990). ....	55

Figura 24 – Diagrama unifilar de parte do SIN referente à interligação Norte-Nordeste utilizado na etapa de avaliação do método proposto (Configuração analisada para 2009). .....	65
Figura 25 – Diagrama unifilar da linha de transmissão de 230 kV, LT FICT, entre as subestações SE B1 e SE B2.....	66
Figura 26– Diagrama unifilar da linha de transmissão de 230 kV, LT FICT (com compensação série em um terminal) entre as subestações SE B1 e SE B2.....	66
Figura 27– Diagrama unifilar da linha de transmissão de 230 kV, LT FICT (com compensação série em dois terminais) entre as subestações SE B1 e SE B2.....	66
Figura 28 – Diagrama unifilar de parte do SIN referente ao SEP no qual se encontra instalada a linha de 230 kV, LT 04M2, entre as subestações Milagres (SE MLG) e Banabuiú (SE BNB) .....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos métodos do Tipo A, B, C e D para localização de faltas.	18
Tabela 2 – Características de falta adotadas durante a simulação de faltas nas LT reais avaliadas. ....	56
Tabela 3 – Localização de faltas em LT reais considerando o algoritmo de LOPES (2011b). ....	57
Tabela 4 – Localização de faltas em LT reais considerando o algoritmo de GIRGIS <i>et al.</i> (1992). ....	57
Tabela 5 – Localização de faltas em LT reais considerando o algoritmo de JOHNS & JAMALI (1990). ....	58
Tabela 6 – Dados da linha de transmissão LT FICT. ....	67
Tabela 7 – Dados dos equivalentes de Thévenin da SE B1 e da SE B2. ....	67
Tabela 8 – Reatância dos bancos de capacitores série em um terminal. ....	67
Tabela 9 – Reatância dos bancos de capacitores série em dois terminais. ....	68
Tabela 10 – Dados dos equivalentes de Thévenin da SE MLG e da SE BNB. ....	69
Tabela 11 – Dados das linhas de transmissão de 230 kV. ....	69

# SUMÁRIO

1	Introdução .....	14
1.1	Apresentação do Trabalho .....	14
1.2	Objetivos .....	14
1.3	Metodologia .....	15
2	Revisão Bibliográfica .....	17
2.1	Descrição dos Algoritmos Avaliados.....	20
2.1.1	LOPES (2011b) .....	21
2.1.2	GIRGIS <i>et al.</i> (1992).....	22
2.1.3	JOHNS & JAMALI (1990).....	24
3	Fundamentação Teórica.....	27
3.1	Fundamentos da Estimação de Fasores.....	27
3.1.1	Filtros <i>Anti-aliasing</i> .....	27
3.1.2	Janelamento de Sinais .....	28
3.1.3	Algoritmo de Fourier de Um Ciclo .....	30
3.1.3.1	Filtro Digital de Fourier de Um Ciclo .....	31
3.1.4	Resposta no Tempo do Algoritmo de Fourier de Um Ciclo .....	33
3.1.4.1	Eliminação da Componente DC de Decaimento Exponencial .....	34
3.2	Descrição do Método Utilizado na Detecção de Transitórios .....	37
3.3	Implementação dos Algoritmos de Localização de Faltas.....	40
4	Resultados e Análises .....	42
4.1	Compensação Série Capacitiva em LT .....	42
4.2	Considerações Sobre a Simulação de Faltas e de Conversores A/D Fazendo uso do ATP.....	43
4.2.1	Conversor A/D Simulado para os Métodos TWFL.....	44
4.2.2	Conversor A/D Simulado para os Métodos Baseados na Análise de Componentes de Frequência Fundamental .....	44
4.3	Cálculo dos Erros das Localizações de Faltas .....	44
4.3.1	Erro Absoluto (EA) .....	44
4.3.2	Erro Relativo (ER) .....	45
4.3.3	Erro Admissível para os Métodos TWFL .....	45
4.4	Simulação de Faltas em LT .....	45
4.5	Análise da Influência de Imprecisões nos Parâmetros da LT .....	46

4.6	Análise da Influência das Características da Falta.....	50
4.7	Análise da Influência da Compensação Série Capacitiva de LT .....	53
4.8	Simulação de Falta LT Reais Com e Sem Compensação Série Capacitiva ...	56
5	Conclusão.....	60
6	Referências Bibliográficas .....	62
APÊNDICE A – Dados dos Sistemas Elétricos Analisados.....		65
A.1	– Descrição do SEP no qual se encontra instalada a LT COL-RGO .....	65
A.2	– Descrição do SEP no qual se encontra instalada a LT FICT.....	66
A.3	– Descrição do SEP no qual se encontra instalada a LT MLG-BNB.....	68

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho de conclusão de curso se enquadra na linha de pesquisa Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência, desenvolvida pelo Grupo de Sistemas Elétricos – GSE, que faz parte do Departamento de Engenharia Elétrica – DEE, da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

O trabalho tem como meta a realização de uma análise comparativa entre alguns métodos para a localização de faltas em linhas de transmissão compensadas, e linhas de transmissão não compensadas.

## 1.2 OBJETIVOS

As linhas de transmissão, para os sistemas elétricos de potência (SEP), são de fundamental importância, dado que elas possibilitam a interligação da geração de energia elétrica até o seu destino final, viabilizando o transporte da energia elétrica até os consumidores. Logo, um dos principais objetivos é que a transmissão da energia se dê com níveis mínimos de perdas e apresente boa continuidade de serviço. A geografia do território brasileiro exige que o sistema de distribuição de energia elétrica no Brasil seja caracterizado por longas linhas de transmissão que além de ligar as unidades geradoras aos grandes centros consumidores também interligam os sistemas elétricos das diferentes regiões do país. Como possuem grandes extensões, as linhas de transmissão podem ter maior susceptibilidade a distúrbios provenientes da ação dos ventos, chuvas, descargas atmosféricas, entre outros. Tornando assim a realização de um diagnóstico rápido e preciso de defeitos ocorridos no sistema de transmissão é de fundamental importância para o seu pronto restabelecimento. Percebe-se que a utilização de métodos eficientes para localização de faltas esta se tornando cada vez mais essencial, pois podem evitar interrupções de fornecimento de energia, assegurando, conseqüentemente, boas taxas de continuidade de serviço e uma restauração rápida da linha com defeito. Atualmente, pode ser encontrada na literatura

uma vasta gama de técnicas que permitem a localização de faltas em linhas de transmissão a partir de diferentes análises e conceitos, cada um com as suas respectivas potencialidades e limitações. No entanto, pouco se relata sobre análises comparativas entre estes métodos, fato este que dificulta a identificação dos pontos positivos e negativos de cada um deles.

O objetivo geral deste trabalho é realizar uma análise comparativa entre alguns dos principais métodos para localização de faltas em linhas de transmissão disponíveis na literatura, contemplando tanto os algoritmos baseados na teoria das ondas viajantes como na análise de componentes de frequência fundamental, a partir de simulações computacionais de faltas em linhas de transmissão realizadas com a linguagem MODELS (DUBE, 1996) do *software* ATP – *Alternative Transients Program* (LEUVEN EMTP CENTER, 1987).

Como objetivos específicos, pretende-se:

- Avaliar o estado da arte de alguns algoritmos propostos na literatura para localização de faltas em linhas de transmissão;
- Implementar os algoritmos avaliados no MATLAB®;
- Utilizar a linguagem MODELS (DUBE, 1996) do ATP – *Alternative Transients Program* para implementar e incorporar os algoritmos estudados às simulações digitais;
- Realizar uma análise comparativa entre os desempenhos dos métodos sob análise através de simulações via ATP;
- Avaliar as potencialidades e limitações dos algoritmos estudados a partir da análise da influência das características de falta, da configuração do sistema elétrico de potência e de imprecisões nos parâmetros da LT sobre a precisão e confiabilidade dos métodos;
- Analisar a influência da compensação série capacitiva de LT acerca dos métodos estudados para realização da localização de defeitos.

### 1.3 METODOLOGIA

Inicialmente foi feita uma revisão bibliográfica acerca dos métodos mais tradicionais e consolidados para localização de faltas em LT, bem como uma rigorosa fundamentação teórica sobre estimação de fasores e sobre a implementação dos

métodos utilizados. Posteriormente, com o uso da linguagem MODELS (DUBE, 1996) do *software* ATP – *Alternative Transients Program* (LEUVEN EMTP CENTER, 1987) foram realizadas simulações com objetivo de validar e comparar os métodos previamente determinados. Foram realizadas simulações de faltas variando o ângulo de incidência, a localização das faltas e a impedância das faltas. Por fim, uma análise comparativa entre os métodos foi realizada levando-se em consideração a influência da compensação série capacitiva da LT estudada.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os métodos baseados na análise de componentes de frequência fundamental são os mais antigos na área de localização de faltas e tais métodos são baseados na estimação de fasores fundamentais de tensão e corrente em pontos específicos do sistema elétrico de potência (SEP) em estudo.

O algoritmo apresentado em TAKAGI *et al.* (1982), para localização de faltas, utiliza dados de apenas um terminal da LT. Como o equacionamento proposto é considerado complexo, os autores propõem a utilização de um microprocessador para realizar os procedimentos matemáticos. O método é bastante sensível às condições de operação do SEP em estudo e às características de falta.

GIRGIS *et al.* (1992) propõem um algoritmo que utiliza fasores fundamentais de tensão e corrente para determinar o ponto de ocorrência da falta em estudo. O método proposto GIRGIS *et al.* (1992) é aplicável em linhas monitoradas em dois e três terminais e independe do tipo de falta.

As mais relevantes limitações dos métodos baseados na análise de componentes de frequência fundamental são por causa da necessidade do conhecimento dos parâmetros das LT defeituosas e à sensibilidade às características do SEP e da falta. Assim, na última década, alguns pesquisadores propuseram técnicas capazes de promover a localização de faltas sem o conhecimento dos parâmetros da LT.

Um algoritmo baseado na análise de dados de tensão e corrente sincronizados via GPS foi desenvolvido por RADOJEVIC *et al.* (2009). Tal algoritmo não requer o conhecimento dos dados de sequência positiva e zero da LT em análise. Os fasores fundamentais são calculados utilizando a transformada rápida de Fourier e as equações propostas promovem o cancelamento de grandezas como a impedância da LT, resistência de falta e o comprimento da linha. Mesmo que o algoritmo seja independente dos parâmetros da LT, ele é dependente do GPS para localizar a falta, fato este que pode consistir numa fonte de erros.

Na tentativa de tornar mais precisa a localização das faltas em linhas de transmissão e suprir as limitações dos métodos baseados em componentes de frequência fundamental, foram criadas pesquisas a fim de determinar o ponto de localização da falta utilizando os distúrbios gerados pela mesma. Trabalhos como o de DOMMEL

&MICHELS (1978) apresentaram conceitos de proteção associados à análise de ondas viajantes provenientes de faltas.

Os métodos baseados na análise de transitórios no domínio do tempo (TWFL) formam o maior grupo dentre as técnicas baseadas na teoria de ondas viajantes. Basicamente, estes algoritmos detectam os instantes de chegada de ondas viajantes provenientes da falta em determinados pontos do SEP monitorado.

GALE *et al.* (1993) classifica os métodos TWFL de localização de faltas em quatro grupos. Um dos critérios para esta classificação é o número de terminais monitorados, a utilização de pulsos elétricos e a utilização de ondas refletidas em um mesmo terminal. Os métodos são separados em quatro grupos, denominados A, B, C e D. É mostrado na Tabela 1 como os métodos são separados o tipo A e C monitoram apenas um terminal e utilizam ondas refletidas, porém os métodos do tipo C utiliza pulsos elétricos e os métodos do tipo A não. Por sua vez, os métodos do tipo B e D utilizam dois terminais para fazer o monitoramento. Os métodos do tipo B também fazem uso de pulsos elétricos e de ondas refletidas. Já os do tipo D não utilizam nem pulsos elétricos e nem ondas refletidas.

Tabela 1 – Classificação dos métodos do Tipo A, B, C e D para localização de faltas.

Classificação	Utiliza pulsos elétricos	Número de terminais utilizados		Utiliza ondas refletidas
		1	2	
<b>TIPO A</b>		✓		✓
<b>TIPO B</b>	✓		✓	✓
<b>TIPO C</b>	✓	✓		✓
<b>TIPO D</b>			✓	

Fonte: Próprio autor.

Passados os anos, os métodos TWFL se consolidaram como métodos promissores e, então, vários trabalhos foram elaborados visando a minimização das fontes de erro atreladas a tais algoritmos. Segundo JIAN *et al.* (1998), os maiores problemas que ainda necessitam de solução são: a determinação do tempo das frentes de

onda nos terminais monitorados e a determinação da velocidade de propagação destas ondas. Ao determinar estes valores de forma mais precisa o método será mais eficiente, assim sendo a localização será mais precisa. JIAN *et al.* (1998) propuseram que as ondas viajantes, na ocorrência de uma falta, se direcionam para ambos os terminais da linha e apresentam componentes de frequência dominante diferentes, logo, têm velocidades de propagação diferentes. JIAN *et al.* (1998) propõem um cálculo espectral para determinação da frequência dominante de cada onda viajante antes do cálculo da localização da falta.

Tal método pode melhorar a precisão da localização das faltas, já que a frequência dominante do sinal influencia na sua velocidade de propagação. Mas, tal método é inviável, já que a análise espectral de um sinal em tempo real exige registros oscilógrafos completos.

Recentemente, técnicas foram desenvolvidas com o objetivo de serem menos sensíveis à presença de ruído. JAMALI & GHEZELJEH (2004) apresentaram conceitos de correlação para localizar faltas a partir de dados de apenas um terminal. Registra-se o primeiro transitório de forma que este sinal passa a ser correlacionado com os sinais refletidos no ponto de falta. A detecção do pico da curva dos coeficientes de correlação implica na identificação do período de tempo necessário para as ondas viajantes percorrerem duas vezes a distância da falta até o ponto monitorado. Este método é pouco influenciado pela resistência de falta, ângulo de incidência de falta bem como da impedância das fontes das extremidades da LT. Mesmo assim, por se tratar de um método de um terminal, a confiabilidade é afetada uma vez que depende da detecção de ondas refletidas.

LIN *et al.* (2008) propõem a utilização dos coeficientes de correlação entre os sinais de tensão nos dois terminais monitorados da linha, devido à presença de ruídos no sistema.

FENG *et al.* (2008), diferentemente dos métodos anteriores, sugeriram um método que independe do cálculo da velocidade de propagação das ondas viajantes. Para isso, são utilizados três instantes de tempo de chegadas diferentes. Desta forma, são utilizadas três barras de monitoramento.

Percebe-se que a velocidade de propagação das ondas deve ser considerada igual em todas as direções, o que pode causar erros como afirmam JIAN *et al.* (1998). Além disso, a necessidade de três Registradores Digitais de Perturbações (RDP) e do

conhecimento do comprimento de mais trechos da linha torna o método mais dispendioso que métodos baseados no monitoramento de apenas dois terminais.

Muitos trabalhos foram publicados no sentido de propor técnicas para detecção de transitórios. SANTOSO *et al.* (1996), por exemplo, propuseram a utilização da TWD para tal finalidade. Basicamente, propõe-se no trabalho a utilização do quadrado dos coeficientes *Wavelet* para detecção e classificação de distúrbios.

Como ferramenta de suporte ao diagnóstico de distúrbios em sistemas de potência, COSTA *et al.* (2010) propõem um método baseado no uso da transformada *Wavelet* Discreta Redundante (TWDR), que é uma variante da Transformada *Wavelet* Discreta (TWD) clássica. Tal método é fundamentado pelo cálculo dos coeficientes *Wavelet* possuem valores muito próximos de zero, em caso de regime permanente. Logo, quando tais coeficientes assumem valor muito diferente de zero, pode-se inferir que aconteceu um transitório eletromagnético, provavelmente proveniente de uma falta na linha de transmissão.

Tal método é limitado pelo fato de que os primeiros coeficientes da transformada *Wavelet* Discreta Redundante dependem dos valores iniciais e finais do sinal original, tal fato acaba gerando um efeito de borda nos primeiros coeficientes gerados. Este efeito de borda pode ser confundido com distúrbios, quando não o são.

É importante lembrar que para a TWDR se faz necessário o monitoramento individual das três fases do sistema em estudo para a detecção correta dos transitórios. Outra característica a ser destacada é que esta transformada utiliza amostras de instantes passados do sistema para o cálculo dos coeficientes *Wavelet* atuais de interesse. Tal dependência não apenas causa o efeito de borda apresentado, mas também pode tornar a implementação de algoritmos localizadores de falta mais complexa (LOPES, 2011a).

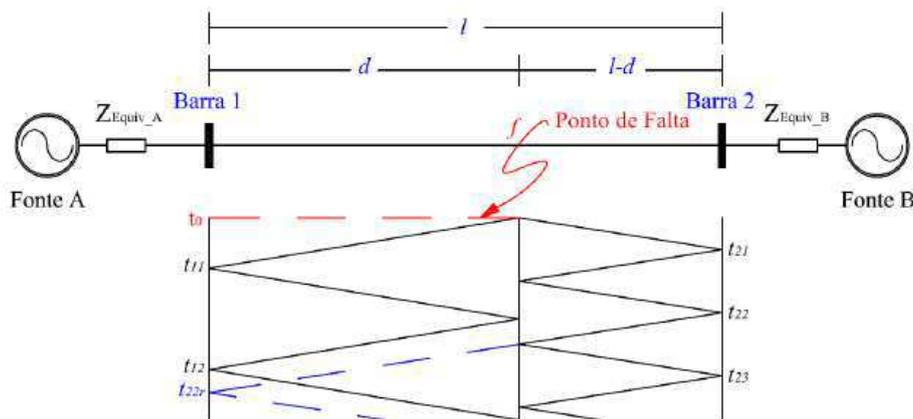
## 2.1 DESCRIÇÃO DOS ALGORITMOS AVALIADOS

Foram escolhidos três métodos de localização de faltas em LT de forma que se tenha variedade nos algoritmos utilizados na localização, sendo um deles TWFL e os outros dois baseados na análise de componentes de frequência fundamental; que estes métodos apresentem ainda boa confiabilidade e que sejam consolidados no cálculo da estimativa do ponto de falta em LT.

### 2.1.1 LOPES (2011B)

O método apresentado em LOPES (2011b) é baseado na detecção de ondas viajantes, provenientes de transitórios gerados a partir de faltas, nos terminais das linhas de transmissão e fixados os instantes de detecção deste transitório para o cálculo da falta, conforme ilustrado na Figura 1 para isto utiliza-se a Transformada de Park (Tdq0).

Figura 1 – Diagramas de reflexões para faltas em linhas de transmissão.



Fonte: Próprio autor.

O método pode ser separado entre o módulo detector, em que deve ser detectado os instantes de tempo  $t_{21}$  e  $t_{11}$  para ser calculado o ponto de falta. E o módulo localizador, que utiliza os instantes de tempo guardados no módulo detector para localizar o ponto de falta.

O módulo detector é executado nas seguintes etapas:

#### **Etapa 1 – Calibração do sistema localizador de faltas:**

Esta etapa tem como objetivo identificar as características mais relevantes dos sinais de tensão do SEP em regime permanente. As variáveis empregadas no processo de detecção de transitórios são autoadaptativas, tornando possível diferenciar de forma mais confiável o regime de falta do regime permanente, sem que haja a necessidade de calibrações manuais LOPES (2012). É realizada também a normalização dos sinais de tensão, viabilizando que o método funcione independentemente do nível de tensão do SEP.

#### **Etapa 2 – Detecção de Transitórios nos Terminais da LT:**

O objetivo desta etapa é desenvolver o algoritmo que irá detectar ondas viajantes criadas a partir do distúrbio. Utilizam-se detectores de transitórios, que monitoram os

sinais de tensão nos terminais da LT, se acontecer algum distúrbio na rede são guardados os instantes de tempo de chegada das ondas provenientes deste distúrbio, e é ativado a operação do módulo localizador de faltas.

### **Etapa 3 – Localização da Falta:**

Nesta etapa será calculada a estimativa do ponto de falta a partir dos instantes iniciais  $t_{21}$  e  $t_{11}$  (ver Figura 1), estes instantes são identificados na etapa 2. As equações utilizadas no cálculo da estimação do ponto de falta são provenientes das expressões para métodos de dois terminais apresentadas em GALE *et al.* (1993). Em LOPES (2011b), foi proposto que deve se considerar o módulo desta diferença  $|t_{11} - t_{21}|$ , permitindo a aplicação do algoritmo de localização de faltas sem a necessidade do uso do GPS. A expressão (1) é utilizada no cálculo do ponto de falta.

$$d = \frac{l + |t_{11} - t_{21}| \cdot v}{2}, \quad (1)$$

onde  $l$  é o comprimento da LT,  $d$  é a distância entre uma das extremidades da LT e o ponto de falta e  $v$  é a velocidade de propagação das ondas viajantes, a qual, em LOPES (2011b), é considerada como sendo igual a 98% da velocidade da luz ( $\approx 300.000$  km/s).

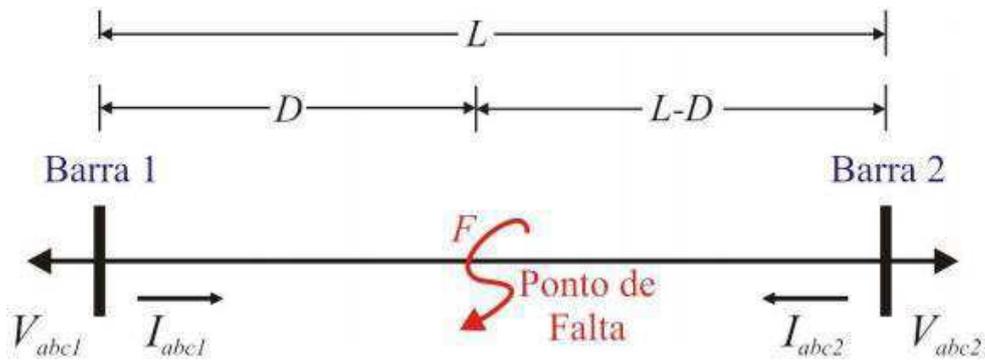
O algoritmo apresentado em LOPES (2011b) pode ser considerado confiável e robusto frente à presença de ruídos elétricos, porém sua precisão é diretamente dependente da taxa de amostragem da rede.

#### 2.1.2 GIRGIS *ET AL.* (1992)

GIRGIS *et al.* (1992) propõem um algoritmo que utiliza fasores fundamentais de tensão e corrente para determinar o ponto de ocorrência da falta em estudo. O método proposto por GIRGIS *et al.* (1992) é aplicável em linhas monitoradas em dois e três terminais, e independe do tipo de falta. Na falta de sincronismo entre os dados é necessário um processo iterativo com o objetivo da obtenção do ponto de ocorrência do distúrbio, bem como do ângulo de sincronização entre a barra de referência e as demais barras do sistema.

Neste trabalho apenas a versão do algoritmo de dois terminais com dados sincronizados será abordada. O sistema considerado em GIRGIS *et al.* (1992) para tal aplicação é apresentado na Figura 2.

Figura 2– Linha de transmissão monitorada em dois terminais.



Fonte: Próprio autor.

Considerando os fasores sincronizados de tensão e corrente nas Barras 1 e 2, a localização de faltas deve ser realizada utilizando as equações (2) e (3).

$$VF_{abc} = V_{abc1} - D \cdot Z_{abc} \cdot I_{abc1} \quad (2)$$

$$VF_{abc} = V_{abc2} - (L - D) \cdot Z_{abc} \cdot I_{abc2} \quad (3)$$

onde:  $VF_{abc}$  = Tensão no ponto de ocorrência da falta;

$V_{abc1}$  e  $V_{abc2}$  = Fasores de tensão trifásica nas barras 1 e 2, respectivamente;

$I_{abc1}$  e  $I_{abc2}$  = Fasores de corrente trifásica nas barras 1 e 2, respectivamente;

$Z_{abc}$  = Matriz impedância série, por unidade de comprimento;

$L$  = Comprimento da linha de transmissão;

$D$  = Distância entre a barra 1 e o ponto de falta.

Considerando a igualdade entre as equações (2) e (3), obtém-se que:

$$V_{abc1} - V_{abc2} + L \cdot Z_{abc} \cdot I_{abc2} = D \cdot Z_{abc} \cdot (I_{abc1} + I_{abc2}) \quad (4)$$

Desta forma, considerando as três fases do sistema, é obtido o equacionamento base para localização de faltas composto pelas expressões (5), (6) e (7).

$$\begin{bmatrix} Y_a \\ Y_b \\ Y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} \cdot D \text{ ou } Y = M \cdot D \quad (5)$$

$$Y_j = V_{j1} - V_{j2} + L \cdot \sum_{i=a,b,c} (Z_{ji} \cdot I_{i2}) \quad (6)$$

$$M_j = \sum_{i=a,b,c} Z_{ji} \cdot (I_{i1} + I_{i2}); j = a, b, c \quad (7)$$

Percebe-se a existência de uma única incógnita que representa a distância da barra 1 ao ponto de falta,  $D$ . As três equações complexas, podem ser usadas para encontrar o valor desta incógnita, que segundo GIRGIS *et al.* (1992), o ponto de ocorrência da falta pode ser determinado resolvendo a expressão (5) por meio do método dos mínimos quadrados. Obtendo assim a expressão (8).

$$D = (M \cdot M^+)^{-1} \cdot M^+ \cdot Y \quad (8)$$

Onde  $M^+$  é a matriz transposta conjugada da matriz  $M$ .

Analisando as variáveis utilizadas nas equações (5) e (7) percebe-se que neste algoritmo é utilizada uma matriz de impedância série do sistema analisado. Os valores desta matriz são obtidos a partir dos parâmetros da LT analisada, conforme descrito em DOMMEL (1996) e apresentado nas expressões a seguir (9), (10) e (11).

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} Z_P & Z_M & Z_M \\ Z_M & Z_P & Z_M \\ Z_M & Z_M & Z_P \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$Z_M = \frac{Z_0 - Z_1}{3} \quad (10)$$

$$Z_P = Z_M + Z_1 \quad (11)$$

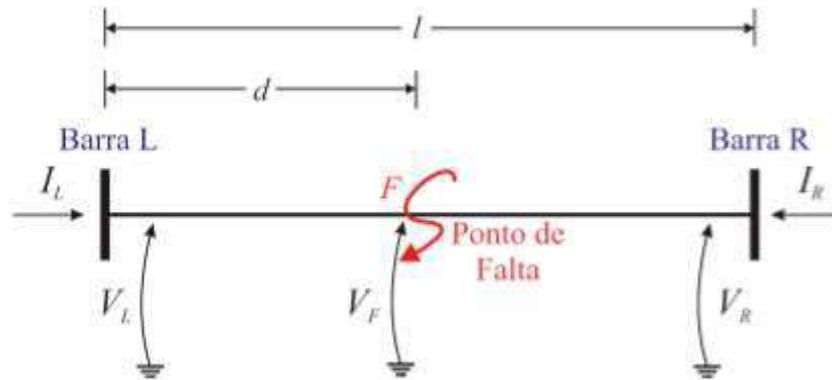
onde  $Z_P$  é a impedância própria da LT,  $Z_M$  é a impedância mútua da LT,  $Z_0$  é a impedância série de sequência zero da LT,  $Z_1$  é a impedância série de sequência positiva da LT e  $Z_{abc}$  é a matriz de impedância série da LT, admitindo-se a transposição da linha.

Os maiores erros do método são notados quando são relacionados a casos de faltas muito próximas às barras monitoradas e quando ocorrem faltas de baixa impedância. No caso de baixas impedâncias evidenciam um ponto negativo do método uma vez que a maioria das faltas em linhas de transmissão longas ocorre em condições de baixa impedância. O grande número de variáveis envolvidas, devido à complexidade do método, também torna o método mais susceptível a erros, pois torna os procedimentos computacionais mais complexos, aumentando a probabilidade de que a localização não seja bem feita. Porém a técnica independe do tipo de falta, logo o método pode ser considerado generalista.

### 2.1.3 JOHNS & JAMALI (1990)

JOHNS & JAMALI (1990) apresentam um método que utiliza dois terminais, que considera em sua formulação matemática, a teoria de quadripólos para localização de faltas em LT. Para ilustrar o método utiliza-se a Figura 3 para representar o diagrama unifilar de um SEP com falta.

Figura 3 – Representação unifilar da LT com falta.



Fonte: Próprio autor.

Neste algoritmo, deve-se, primeiramente, decompor as grandezas de fase em grandezas no domínio modal, segundo JOHNS & JAMALI (1990). Como mostrado na equação (12).

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 3/2 & 0 & -3/2 \\ 1/2 & -1 & 1/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \quad (12)$$

onde  $v_a$ ,  $v_b$  e  $v_c$  são as grandezas no domínio de fase e  $v_1$ ,  $v_2$  e  $v_3$  são as grandezas no domínio modal.

O mesmo tratamento de grandezas deve ser feito com as correntes de fase. Sendo assim emprega-se a teoria de quadripólos para calcular o fasor da tensão  $V_F$  no ponto de falta  $F$ . Usando dados da Barra  $L$  tem-se na expressão (13).

$$V_F = \cosh(\gamma \cdot d) \cdot V_L - Z_c \cdot \sinh(\gamma \cdot d) \cdot I_L, \quad (13)$$

Ainda usando a teoria dos quadripólos e usando dados da barra  $R$  tem-se na expressão (14).

$$V_F = \cosh[\gamma \cdot (l - d)] \cdot V_R - Z_c \cdot \sinh[\gamma \cdot (l - d)] \cdot I_R, \quad (14)$$

onde  $V_L$ ,  $V_R$ ,  $I_L$ ,  $I_R$ , são os fasores de tensão e corrente das componentes no domínio modal,  $Z_c$  e  $\gamma$  são, respectivamente, a impedância característica da LT e a constante de propagação da LT, também no domínio modal.

Igualando as expressões (13) e (14) e realizando algumas manipulações matemáticas, é obtida a expressão para cálculo da distância  $d$  entre à Barra  $L$  e o ponto de falta  $F$ , conforme apresentado na equação (15).

$$d = \operatorname{atanh} \left[ \frac{V_L - V_R \cdot \cosh(\gamma \cdot l) + Z_c \cdot I_R \cdot \sinh(\gamma \cdot l)}{Z_c \cdot I_L - V_R \cdot \sinh(\gamma \cdot l) + Z_c \cdot I_R \cdot \cosh(\gamma \cdot l)} \right] \cdot \frac{1}{\gamma} \quad (15)$$

Sendo  $Z_c$  e  $\gamma$  dados por:

$$Z_c = \sqrt{\frac{(R_m + j \cdot \omega \cdot L_m)}{(G_m + j \cdot \omega \cdot C_m)}} \quad (16)$$

$$\gamma = \sqrt{(R_m + j \cdot \omega \cdot L_m) \cdot (G_m + j \cdot \omega \cdot C_m)} \quad (17)$$

em que,  $R_m$ ,  $L_m$  e  $C_m$  são os parâmetros da LT de resistência, indutância e capacitância por unidade de comprimento ( $\Omega/\text{km}$ ,  $\text{H}/\text{km}$  e  $\text{F}/\text{km}$ , respectivamente),  $G_m$  é a condutância por unidade de comprimento ( $\text{mho}/\text{km}$ , geralmente desprezível),  $\omega$  é a frequência angular fundamental do sistema e  $m$  é modo do domínio modal considerado.

Os resultados obtidos através da equação (15) são números complexos, logo a localização estimada possui parte imaginária, mas segundo JOHNS & JAMALI (1990) apenas a parte real de  $d$  deve ser considerada como resultado. Um dos erros que este método pode gerar, é devido ao fato de que para cada componente modal um valor para  $d$  é obtido, logo dependendo do tipo da falta, é possível que apenas um dos resultados esteja correto, podendo assim causar confusão na escolha do resultado a ser considerado o ponto de localização da falta.

Entre as limitações do método estão a necessidade do uso do GPS e da classificação do distúrbio para escolha da localização correta, bem como a dependência do conhecimento dos parâmetros da LT. Quando os parâmetros não são conhecidos ou não são muito precisos, podem ocorrer erros relevantes nas localizações calculadas. Porém, nos casos em que os parâmetros da LT apresentam boa precisão, este método é bastante preciso mesmo quando variadas as características de falta.

## 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O objetivo principal deste tópico é a apresentação de conceitos fundamentais sobre os algoritmos de estimação de fasores e de detecção de transitórios utilizados na implementação dos métodos avaliados.

### 3.1 FUNDAMENTOS DA ESTIMAÇÃO DE FASORES

Os algoritmos de estimação de fasores são utilizados para encontrar o módulo e fase da componente fundamental de sinais periódicos. Estas técnicas utilizam como entrada um conjunto de amostras do sinal avaliado e, por isso, são também conhecidas como filtros digitais para estimação de fasores (LOPES, 2012).

Para implementar os métodos de localização de faltas baseados na análise de componentes fundamentais, optou-se por utilizar o algoritmo de Fourier de um ciclo, uma vez que é uma técnica tradicional, popular e já consolidada na área de proteção de SEP. Todos os algoritmos de estimação de fasores requerem digitalização e janelamento dos sinais analógicos a serem estimados.

#### 3.1.1 FILTROS *ANTI-ALIASING*

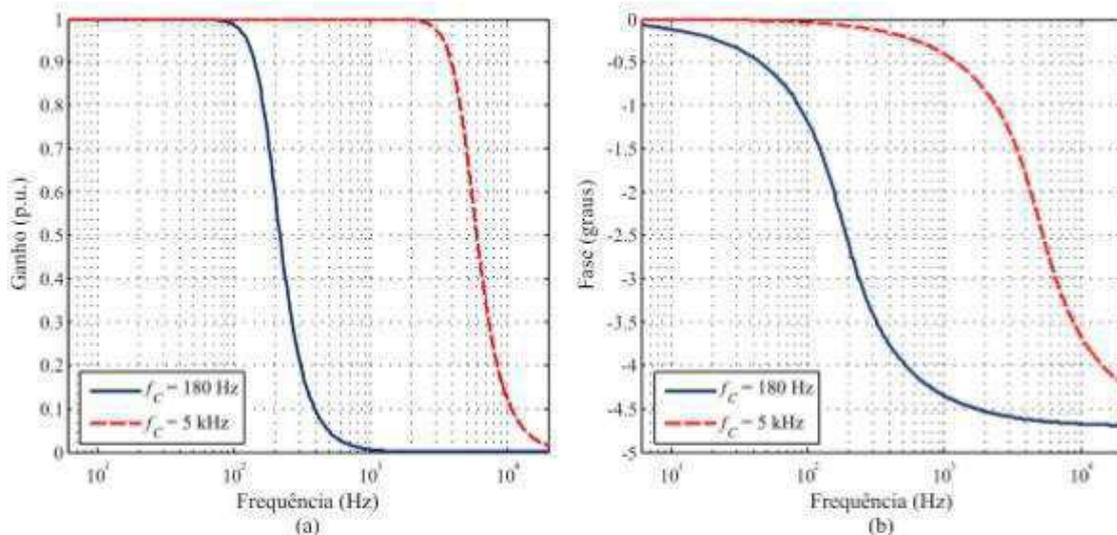
Os filtros *anti-aliasing* são filtros passa-baixas, que de acordo com o teorema de Nyquist, devem eliminar componentes com frequências maiores que a metade da frequência de amostragem adotada pelo conversor A/D. Estes filtros encontram-se instalados nos relés digitais e RDP responsáveis pelo monitoramento do SEP.

Os filtros Butterworth até terceira ordem são os mais utilizados em relés digitais e RDP, segundo PHADKE & THORP (2009), já que não apresentam oscilações ao longo da faixa de passagem e não promovem desvios consideráveis na fase do sinal filtrado. Foram considerados neste trabalho dois filtros Butterworth de 3ª ordem com frequências de corte iguais a 180 Hz (Frequência abaixo dos 480 Hz necessários para filtrar corretamente os sinais analógicos que são amostrados neste trabalho, para os métodos baseados na análise de componentes de frequência fundamental, a uma frequência de 960 Hz) e 5 kHz (frequência abaixo dos 10 kHz necessários para filtrar

corretamente os sinais analógicos que são amostrados neste trabalho, para os métodos TWFL, a uma frequência de 20 kHz), sendo ambos e utilizados, respectivamente, durante a localização de faltas através dos algoritmos baseados na análise de componentes fundamentais e pelos métodos TWFL.

Para a implementação desses filtros foram projetados funções do MATLAB® que recebem como entradas a frequência de corte e a ordem do filtro e retornam as funções de transferência. Os diagramas de Bode dos filtros Butterworth projetados são apresentadas na Figura 4. Dependendo do filtro aplicado, ocorre uma variação da atenuação das componentes de alta frequência, fato este condizente com os conceitos envolvidos nas diferentes técnicas de localização de faltas.

Figura 4 – Resposta em frequência dos filtros Butterworth projetados: (a) Ganho; (b) Fase.

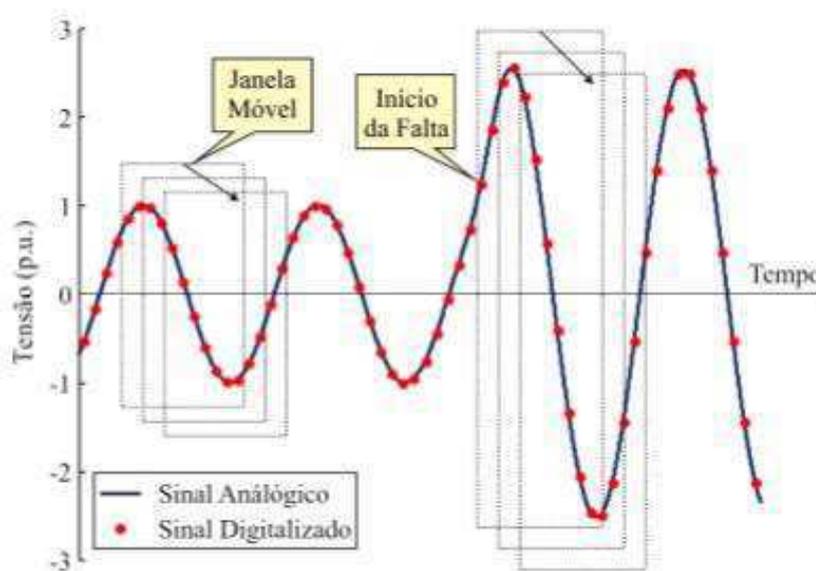


Fonte: Próprio autor.

### 3.1.2 JANELAMENTO DE SINAIS

O processamento de uma determinada quantidade de amostras é denominado janelamento de sinais. Após cada conversão A/D a amostra mais recente é incluída na janela, enquanto a mais antiga é descartada, como pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 – Exemplo de esquema de janelamento.



Fonte: Próprio autor.

Em cada janela de dados que foram amostradas é determinada a amplitude e a fase dos fasores na frequência fundamental do sinal. Sendo assim, quando em regime permanente as janelas possuem o sinal sem falta, porém na ocorrência do distúrbio tem início um período de transição em que as janelas possuem amostras do sinal com e sem a falta.

Segundo COURY *et al.* (2007) o cálculo do ponto de falta correto só pode ser realizado quando as janelas contêm apenas amostras do sinal com a falta e sem a falta. Logo quanto mais curtas forem estas janelas mais rápido a detecção do transitório pode ser efetuada.

Neste trabalho, as janelas foram consideradas com tamanho igual a um ciclo dos sinais avaliados. Para os métodos TWFL, utilizam-se janelas com tamanho igual a meio ciclo em regime permanente. É importante observar que o número de amostras em cada janela dependerá das frequências de amostragem adotadas para cada caso.

### 3.1.3 ALGORITMO DE FOURIER DE UM CICLO

Um sinal periódico com frequência fundamental  $f_0$  pode ser escrito na forma da expressão (18).

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} a_n \cos(2\pi n f_0 t) + \sum_{n=1}^{+\infty} b_n \text{sen}(2\pi n f_0 t), \quad (18)$$

onde  $n f_0$  é a  $n$ -ésima harmônica do sinal  $x(t)$  e  $a_0$ ,  $a_n$  e  $b_n$  são os coeficientes da série de Fourier, que são calculados por:

$$a_0 = \frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} x(t) dt, \quad (19)$$

$$a_n = \frac{2}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} x(t) \cos(2\pi n f_0 t) dt, \quad (20)$$

$$b_n = \frac{2}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} x(t) \text{sen}(2\pi n f_0 t) dt. \quad (21)$$

Desta forma, considerando apenas os coeficientes de uma mesma harmônica, é possível reescrever a equação (18) da seguinte forma:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{+\infty} A_n \cos(2\pi n f_0 t + \phi_n), \quad (22)$$

onde  $A_n$  e  $\phi_n$  são calculados através das expressões (23) e (24) e são referentes, respectivamente, à amplitude e à fase do sinal periódico avaliado.

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad (23)$$

$$\phi_n = \arctan\left(-\frac{b_n}{a_n}\right). \quad (24)$$

O fasor do sinal  $x(t)$  pode é dado por:

$$\hat{X}_n = \frac{A_n}{\sqrt{2}} \angle \phi_n = \frac{1}{\sqrt{2}} (a_n - j b_n), \quad (25)$$

Logo, tomando-se um período de análise igual a um ciclo do sinal periódico  $x(t)$ , é obtido a formulação matemática do algoritmo de Fourier de um ciclo.

É necessário o cálculo dos coeficientes do filtro digital de Fourier de um ciclo, para estimação de fasores no domínio digital.

### 3.1.3.1 FILTRO DIGITAL DE FOURIER DE UM CICLO

O algoritmo de Fourier de um ciclo é comumente referenciado pela sigla FCDFT. Este algoritmo de estimação de fasores utiliza janelas de dados que compreendem um período  $T_0$  de um sinal periódico  $x(t)$  na frequência fundamental, ou seja,  $n$  igual a 1 (ver expressões de (18) a (22)). Portanto, a partir do equacionamento apresentado anteriormente, são obtidas as expressões (26) e (27).

$$X_{re} = \frac{2}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} x(t) \cos(2\pi f_0 t) dt, \quad (26)$$

$$X_{im} = \frac{2}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} x(t) \text{sen}(2\pi f_0 t) dt, \quad (27)$$

Considerando-se janelas com  $N$  amostras referentes a um ciclo da frequência fundamental de  $x(t)$ , as equações (26) e (27) podem ser transcritas para o domínio digital conforme demonstrado nas expressões (28) e (29) (JOHNS & SALMAN, 1995).

$$X_{re} \approx \frac{2}{N \Delta t} [x_0 \cos(\Omega_0 t_0) + x_1 \cos(\Omega_0 t_1) + x_2 \cos(\Omega_0 t_2) + \dots + x_{N-1} \cos(\Omega_0 t_{N-1})] \Delta t, \quad (28)$$

$$X_{im} \approx \frac{2}{N \Delta t} [x_0 \text{sen}(\Omega_0 t_0) + x_1 \text{sen}(\Omega_0 t_1) + x_2 \text{sen}(\Omega_0 t_2) + \dots + x_{N-1} \text{sen}(\Omega_0 t_{N-1})] \Delta t, \quad (29)$$

sendo  $\Delta t$  o período de amostragem utilizado pelo conversor A/D dos relés digitais ou RDP,  $\Omega_0 = 2\pi f_0$ ,  $t_k = k\Delta t$  e  $x_k = x(t_k)$ . Desta maneira, as expressões para cálculo das partes real  $X_{re}$  e imaginária  $X_{im}$  do sinal  $x(t)$  em estudo, são dadas por

$$X_{re} = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \cos\left(\frac{2\pi}{N} k\right), \quad (30)$$

$$X_{im} = -\frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \text{sen}\left(\frac{2\pi}{N} k\right). \quad (31)$$

As expressões (30) e (31) representam o processo de filtragem digital do algoritmo FCDFT, de forma que as referidas equações podem ser reescritas conforme demonstrado a seguir nas expressões (32) e (33).

$$X_{re} = \sum_{k=0}^{N-1} x_k \mathbf{h}_{re,k}, \quad (32)$$

$$X_{im} = \sum_{k=0}^{N-1} x_k \mathbf{h}_{im,k}, \quad (33)$$

onde  $\mathbf{h}_{re,k}$  e  $\mathbf{h}_{im,k}$  são, respectivamente, as  $k$ -ésimas amostras dos coeficientes dos filtros digitais de Fourier de um ciclo  $\mathbf{h}_{re}$  e  $\mathbf{h}_{im}$ , sendo estes calculados através das expressões (34) e (35).

$$\mathbf{h}_{re} = \frac{2}{N} [\cos(\Omega_0 t_0) \cos(\Omega_0 t_1) \cos(\Omega_0 t_2) \cdots \cos(\Omega_0 t_{N-1})] \quad (34)$$

$$\mathbf{h}_{im} = -\frac{2}{N} [\sin(\Omega_0 t_0) \sin(\Omega_0 t_1) \sin(\Omega_0 t_2) \cdots \sin(\Omega_0 t_{N-1})] \quad (35)$$

Por fim, uma vez calculadas as partes real e imaginária do sinal avaliado, utilizam-se as expressões (36) e (37) para calcular a amplitude  $A_m$  e a fase  $\phi_m$ , respectivamente, do fasor na frequência fundamental.

$$A_m = \sqrt{X_{re}^2 + X_{im}^2} \quad (36)$$

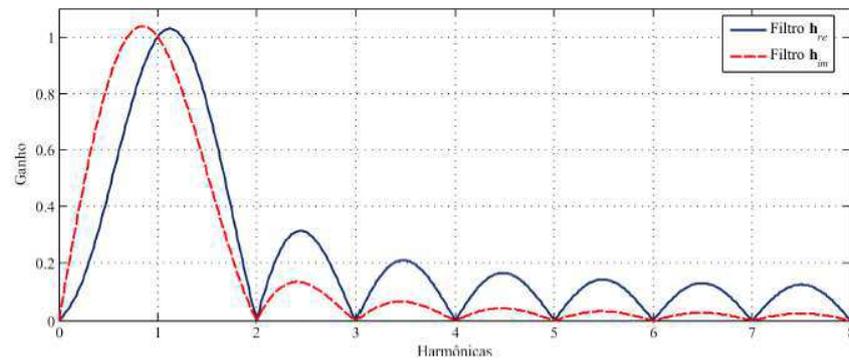
$$\phi_m = \arctan\left(\frac{X_{im}}{X_{re}}\right) \quad (37)$$

Este método de estimação de fasores utiliza uma janela de dados. Uma característica deste método de estimação de fasores é a simplicidade de implementação computacional visto que os coeficientes dos filtros digitais  $\mathbf{h}_{re}$  e  $\mathbf{h}_{im}$  podem ser calculados de forma *off-line* sem requerer um grande esforço computacional (LOPES 2012).

Na Figura 6 é apresentada a resposta em frequência do módulo e da fase dos filtros digitais de Fourier  $\mathbf{h}_{re}$  e  $\mathbf{h}_{im}$ . Na Figura 7 é apresentada a convolução entre as respostas em frequência dos filtros  $\mathbf{h}_{re}$  e  $\mathbf{h}_{im}$  e do filtro *anti-aliasing* Butterworth implementado para limitação de banda dos sinais avaliados.

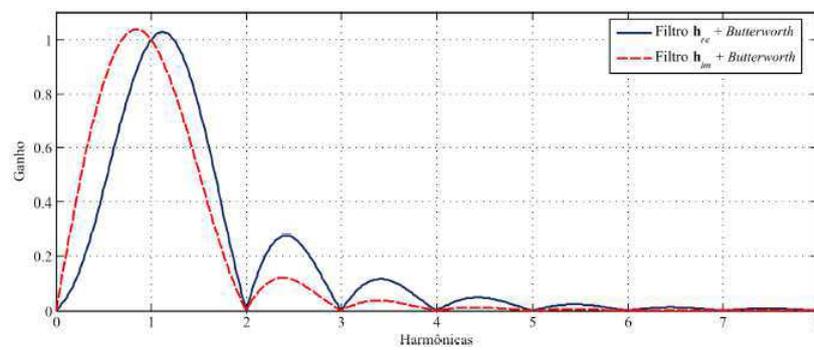
Na frequência fundamental o ganho apresentado pelos filtros digitais  $\mathbf{h}_{re}$  e  $\mathbf{h}_{im}$  são unitários e nulo para outros valores de frequência, da mesma forma funciona o filtro *anti-aliasing* Butterworth. A atenuação provocada pela ação dos filtros *anti-aliasing* Butterworth implica em alterações nas repostas em frequência dos filtros  $\mathbf{h}_{re}$  e  $\mathbf{h}_{im}$ , dentre estas alterações destaca-se a atenuação das componentes interhamônicas de 180 Hz.

Figura 6 – Resposta em frequência dos módulos dos filtros digitais de Fourier de um ciclo.



Fonte: Próprio autor.

Figura 7 – Resposta em frequência dos módulos dos filtros digitais de Fourier de um ciclo



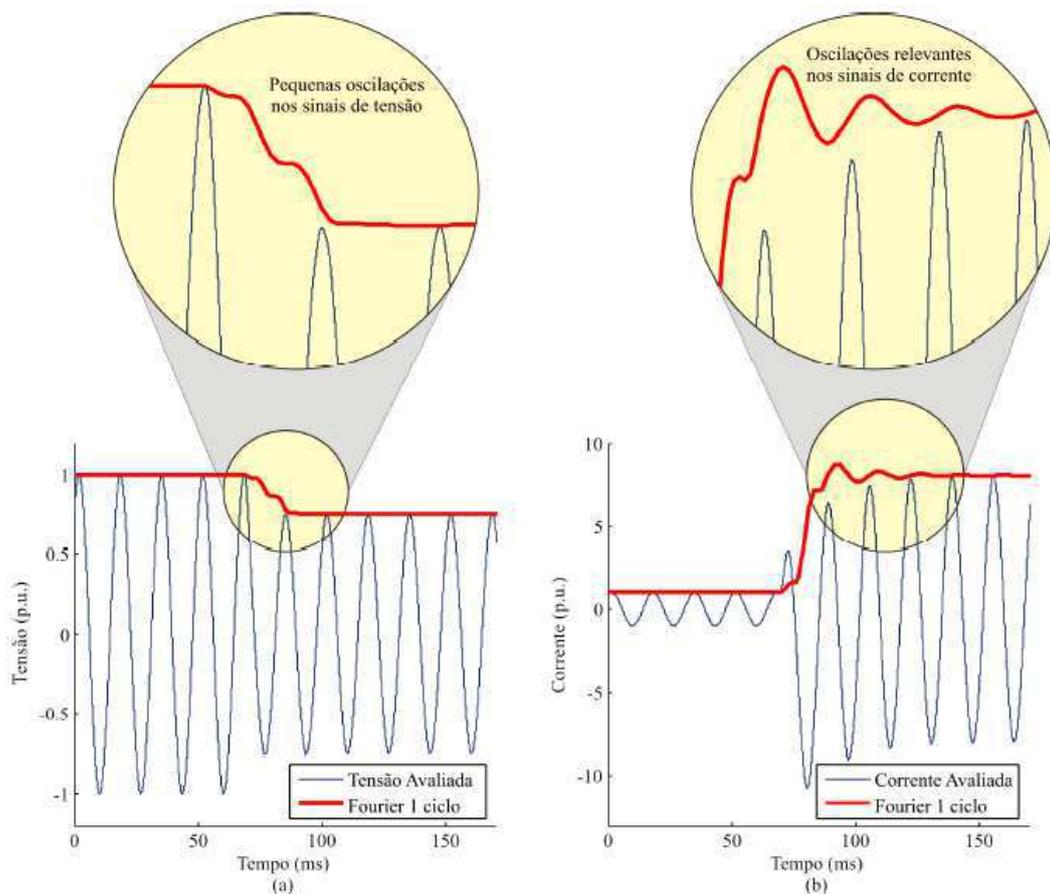
Fonte: Próprio autor.

### 3.1.4 RESPOSTA NO TEMPO DO ALGORITMO DE FOURIER DE UM CICLO

Nesta subseção são apresentados conceitos sobre o período de transição iniciado logo após uma falta na estimação de fasores. Quando a janela de amostras contém amostras com e sem falta.

É apresentado na Figura 8 os registros oscilográficos da implementação do algoritmo FCDFT sobre os sinais de tensão e corrente. Para este caso foi considerada uma taxa de amostragem de 1,0416 ms, considerando a frequência em 60 Hz, isto resulta em 16 amostras por ciclo. Nos primeiros instantes do transitório é perceptível que as formas de onda de tensão e corrente deixam de ser puramente senoidais. Conforme apresentado em SILVA (2009) isto se deve ao fato da aparição de uma componente DC com decaimento exponencial, cuja amplitude depende dos valores de tensão e corrente do instante imediatamente anterior ao transitório.

Figura 8 – Resposta no tempo do algoritmo de Fourier de um ciclo: (a) Tensão; (b) Corrente.



Fonte: Próprio autor.

Tais componentes DC com decaimento exponencial podem resultar em retardos na convergência dos resultados, pois o método faz uso dos fasores no regime permanente da falta. Logo o objetivo é que os efeitos dessa componente DC sejam minimizados o máximo possível.

#### 3.1.4.1 ELIMINAÇÃO DA COMPONENTE DC DE DECAIMENTO EXPONENCIAL

Sabendo que o nível DC de um sinal ocorre na frequência 0 Hz, SILVA (2009) e BENMOUYAL (1995) apresentam análises sobre a atenuação de um filtro passa-altas, denominado filtro mímico. Um filtro passa-altas provoca atenuação sobre baixas frequências, logo ele provoca forte atenuação em níveis DC. É utilizado neste trabalho um filtro mímico digital modelado em BENMOUYAL (1995) cuja equação que define a filtragem no domínio do tempo discreto é demonstrada na expressão (38).

$$x^*(k) = K[(1 + \tau_d) \cdot x(k) - \tau_d \cdot x(k-1)], \quad (38)$$

onde  $x^*(k)$  é a amostra do sinal filtrado no instante  $k$ ,  $x(k)$  e  $x(k-1)$  são, respectivamente, as amostras do sinal original nos instantes  $k$  e  $k-1$ .

O parâmetro  $\tau_d$  é a constante de tempo da LT em estudo e é expressa em número de amostras. O cálculo desta constante é realizado através da expressão (39).

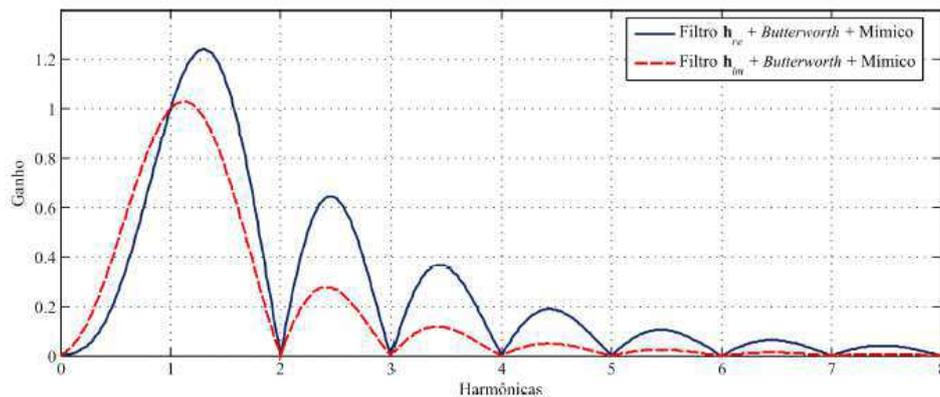
$$\tau_d = \frac{\left( \frac{L_1}{R_1} \right)}{\Delta t}, \quad (39)$$

sendo  $L_1$  e  $R_1$  a indutância e a resistência de sequência positiva da LT, respectivamente. Já o parâmetro  $K$  é o ganho do filtro mímico digital e, conforme descrito em BENMOUYAL (1995), deve apresentar valor unitário na frequência nominal do SEP. Portanto, a partir desta consideração, a expressão para o cálculo do ganho  $K$  é dada por:

$$K = \sqrt{\frac{1}{\left[ (1 + \tau_d) - \tau_d \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right) \right]^2 + \left[ \tau_d \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{N}\right) \right]^2}}. \quad (40)$$

O filtro mímico digital proposto em BENMOUYAL (1995) foi considerado em todos os procedimentos de estimação de fasores realizados neste trabalho. São apresentadas as respostas em frequência dos filtros  $\mathbf{h}_{re}$  e  $\mathbf{h}_{im}$  em cascata com o filtro *anti-aliasing* e com o referido filtro mímico na Figura 9.

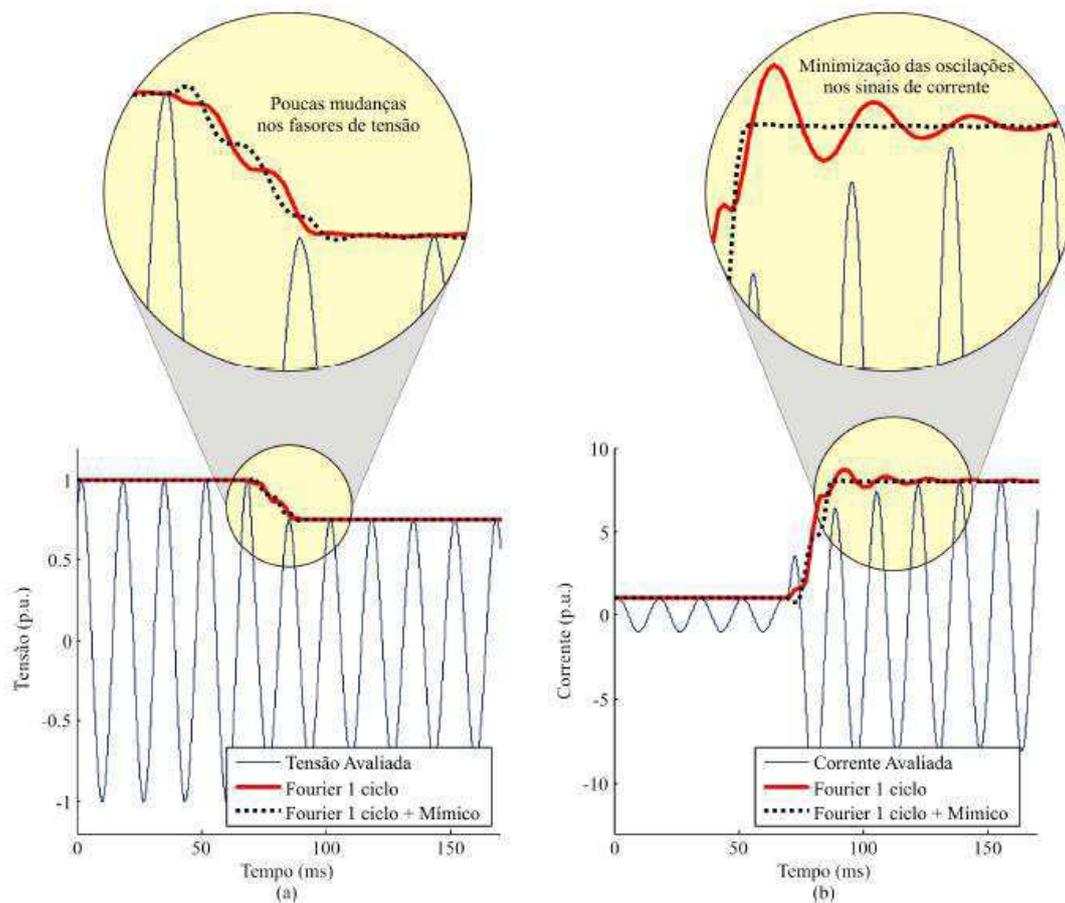
Figura 9 – Resposta em frequência dos módulos dos filtros digitais de Fourier de um ciclo



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 10, são evidenciados os módulos dos fasores calculados para o mesmo registro apresentado na Figura 8 com e sem o filtro mímico digital.

Figura 10 – Resposta no tempo do algoritmo de Fourier de um ciclo: (a) Tensão; (b) Corrente.



Fonte: Próprio autor.

Por ser um filtro passa-altas, o filtro mímico causa uma pequena amplificação das componentes harmônicas antes atenuadas pelo filtro Butterworth *anti-aliasing*. Além disto, os módulos dos filtros  $\mathbf{h}_{re}$  e  $\mathbf{h}_{im}$  em passam a atenuar mais evidentemente as sub-harmônicas entre a componente DC e a primeira harmônica (frequência nominal do SEP). Assim, elimina-se quase que totalmente a componente DC de decaimento exponencial.

O valor da constante  $\tau_d$  equivale a aproximadamente um período dos sinais em regime permanente. O método permite a obtenção mais rápida dos fasores de tensão e corrente no regime permanente, ocasionando que as localizações estimadas também oscilam menos e, conseqüentemente, são fornecidas de forma mais rápida e confiável.

## 3.2 DESCRIÇÃO DO MÉTODO UTILIZADO NA DETECÇÃO DE TRANSITÓRIOS

Nos algoritmos TWFL o principal objetivo é a detecção das ondas viajantes que se propagam em forma de transitórios eletromagnéticos pela LT.

A técnica utilizada para detecção de transitórios utilizadas na implementação dos métodos TWFL neste trabalho, é baseada na transformada de Park como proposto em LOPES (2011a). A detecção de transitórios é realizada a partir da taxa de crescimento da energia  $\zeta_{dif}$  obtida através do processamento das amostras janeladas dos sinais  $c_{dif}$  calculados a partir das tensões  $V_d$ , que por sua vez são determinadas através da expressão (41).

$$V_d(k) = A_{Park}(k) \cdot V_A(k) + B_{Park}(k) \cdot V_B(k) + C_{Park}(k) \cdot V_C(k), \quad (41)$$

sendo  $A_{Park}$ ,  $B_{Park}$  e  $C_{Park}$  dados por:

$$A_{Park}(k) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \cos(\omega k \Delta t + \theta), \quad (42)$$

$$B_{Park}(k) = -\frac{1}{\sqrt{6}} \cdot \cos(\omega k \Delta t + \theta) + \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \sin(\omega k \Delta t + \theta), \quad (43)$$

$$C_{Park}(k) = -\frac{1}{\sqrt{6}} \cdot \cos(\omega k \Delta t + \theta) - \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \sin(\omega k \Delta t + \theta), \quad (44)$$

onde  $\omega$  é a frequência angular nominal do sistema,  $k$  é a  $k$ -ésima amostra dos sinais avaliados,  $\Delta t$  é o período de amostragem utilizado durante a conversão A/D dos sinais analógicos,  $\theta$  é o ângulo de fase da tensão  $V_d$  e  $V_A(k)$ ,  $V_B(k)$  e  $V_C(k)$  são as  $k$ -ésimas amostras das tensões de fase do SEP analisado.

Para o cálculo dos coeficientes  $c_{dif}$  e da energia  $\zeta_{dif}$ , são empregadas as expressões (45) e (46), conforme apresentado a seguir.

$$c_{dif}(k) = G \cdot [V_d(k) - V_d(k-1)], \quad (45)$$

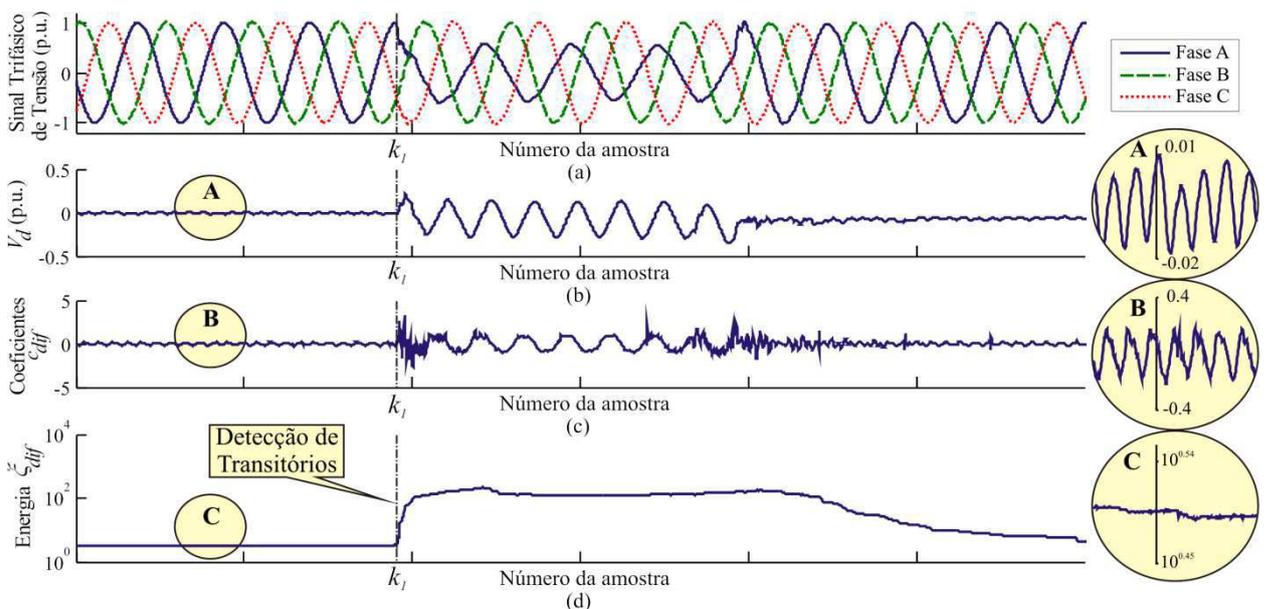
$$\zeta_{dif}(k) = \sum_{n=k-\Delta k_{EN}+1}^k c_{dif}^2(n), \quad (46)$$

onde  $k_{EN} = N/2$  sendo  $N$  o número de amostras por ciclo em regime permanente,  $G$  é o ganho aplicado aos coeficientes  $c_{dif}$ ,  $V_d(k)$  é a  $k$ -ésima amostra do sinal  $V_d$ ,  $c_{dif}(n)$  é a  $n$ -ésima amostra do sinal  $c_{dif}$  janelado e  $\zeta_{dif}(k)$  é a energia da  $k$ -ésima janela.

Os coeficientes  $c_{dif}$  não relacionados à ocorrência de transitórios devem ser descartados, e para isso utiliza-se, geralmente, um procedimento de filtragem denominado de *hard thresholding*, nos quais os coeficientes abaixo de determinado limiar, são considerados zero. Porém estes métodos são bastante susceptíveis ao ruído e podem detectar erroneamente um transitório. Ao tentar tornar a detecção de componentes de alta frequência mais robusta em relação à presença de ruídos elétricos, calcula-se a energia dos coeficientes  $c_{dif}$  que são os coeficientes  $\zeta_{dif}$  (LIMA *et al.*, 2016).

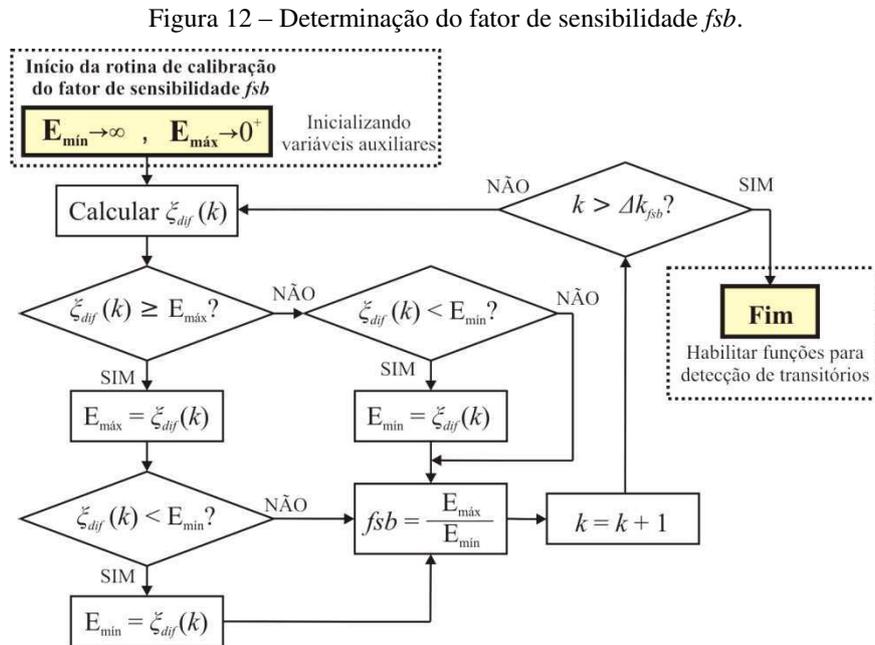
Na Figura 11 são apresentadas formas de onda dos sinais  $V_d$ ,  $c_{dif}$  e  $\zeta_{dif}$  durante a detecção de uma falta auto-extinta iniciada na amostra  $k_1$ . O zoom no período de regime permanente permite a verificação da frequência dominante de 120 Hz nos sinais  $V_d$  e  $c_{dif}$ , e a comparação dos níveis de ruído presentes nos sinais  $c_{dif}$  e  $\zeta_{dif}$ . Em LOPES (2011b), utilizam-se de fatores de sensibilidade  $fsb$ , que são limiares auto-adaptativos, os quais são calculados a fim de permitir uma detecção precisa de variações abruptas da energia  $\zeta_{dif}$ . Basicamente, os fatores  $fsb$  são proporcionais à razão entre o valor máximo e o valor mínimo da energia  $\zeta_{dif}$  ao longo de um período  $\Delta k_{fsb}$  programável (em número de amostras) no regime permanente. Neste projeto, o período  $\Delta k_{fsb}$  é equivalente a dois ciclos completos de um sinal operando a 60 Hz.

Figura 11 – Detecção de transitórios em um registro oscilográfico real via Tdq0: (a) Sinal trifásico de tensão; (b) Tensão de eixo direto  $V_d$ ; (c) Coeficientes  $c_{dif}$ ; (d) Energia  $\zeta_{dif}$  dos coeficientes  $c_{dif}$ .



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 12, ilustra-se o fluxograma da rotina de calibração dos fatores de sensibilidade  $fsb$ . As variáveis auxiliares  $E_{máx}$  e  $E_{mín}$  são empregadas ao longo do processo de atualização dos valores máximos e mínimos assumidos pela energia  $\zeta_{dif}$  ao longo de um período  $\Delta k_{fsb}$ .



Fonte: Próprio autor.

Quando calibrados os fatores  $fsb$ , as funções que detectam os transitórios nas LT são habilitadas. A partir daí são analisados, em tempo real, os estados dos disjuntores e as variações da energia  $\zeta_{dif}$  num período  $\Delta k_{DETEC} = N/10$  equivalente a um décimo de ciclo na frequência fundamental. O parâmetro  $N$  pode ser calculado pela expressão (47).

$$N = \text{round}\left(\frac{F_s}{f_{60\text{Hz}}}\right), \quad (47)$$

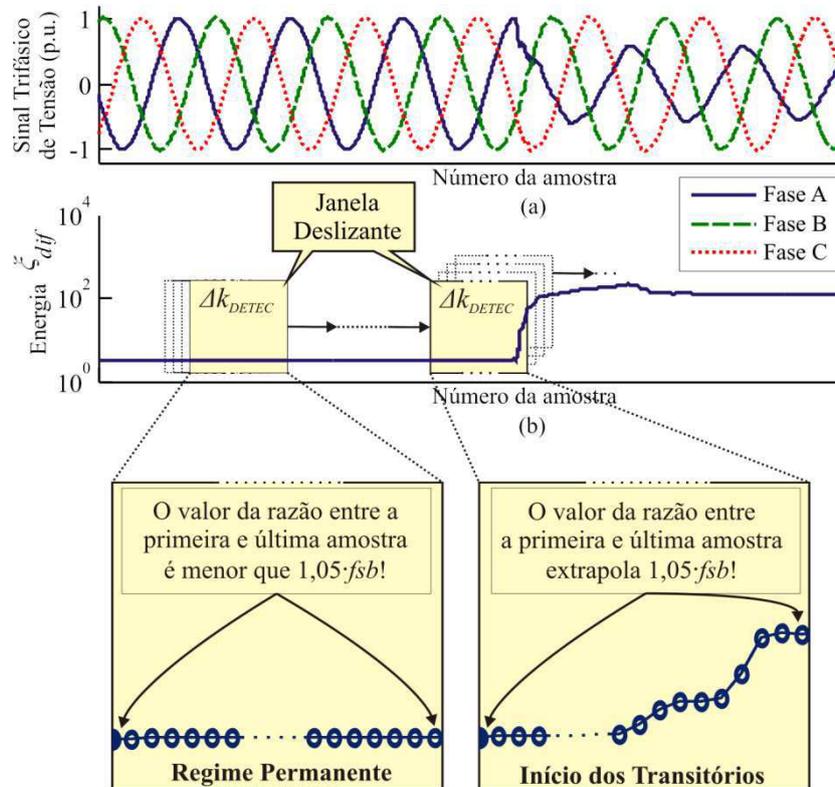
em que  $F_s$  é a frequência de amostragem utilizada na conversão A/D (dada em Hertz),  $f_{60\text{Hz}}$  é a frequência fundamental, 60 hertz, e  $\text{round}(X)$  é uma função que arredonda  $X$  para o número inteiro mais próximo.

A detecção de transitórios é feita pela identificação de crescimentos abruptos da energia  $\zeta_{dif}$ . Para tanto, utiliza-se um *buffer* de tamanho igual a  $\Delta k_{DETEC}$  que consiste numa janela deslizante no tempo sobre o sinal  $\zeta_{dif}$  calculado.

Para garantir uma maior robustez do sistema detector frente à presença de ruídos elétricos, desbalanceamentos entre fases ou mesmo distúrbios fora da LT monitorada, considera-se uma margem de segurança de 5% sobre o  $fsb$  calculado. Desta forma,

apenas variações de energia maiores que 1,05 vezes  $fsb$  são caracterizadas como ocorrência de transitórios.

Figura 13 – Detecção de transitórios: (a) Sinal trifásico de tensão; (b) Energia  $\xi_{dif}$  dos coeficientes  $cdif$ .



Fonte: Próprio autor.

A margem de segurança (de 5% sobre o valor de  $fsb$ ) como os períodos  $\Delta k_{fsb}$  e  $\Delta k_{DETEC}$  podem ser programáveis. Desta forma, o usuário do sistema localizador pode tornar os módulos detectores mais ou menos sensíveis à presença de ruídos ou sensibilizá-los apenas para detecção de transitórios com amplitudes mais relevantes.

### 3.3 IMPLEMENTAÇÃO DOS ALGORITMOS DE LOCALIZAÇÃO DE FALTAS

As funções de estimação de fasores e de detecção de transitórios apresentadas permitem a implementação dos algoritmos de localização de faltas avaliados neste trabalho. Por se tratarem de algoritmos digitais, estas técnicas podem ser programadas em *Intelligent Electronic Devices* (IED) como, por exemplo, relés digitais e RDP. Desta

forma, a implementação dos algoritmos de localização de faltas pode ser realizada via *software* desde que exista um sistema concentrador de dados que permita a comunicação entre IED instalados em pontos distintos do SEP.

Neste trabalho, as funções de estimação de fasores e de detecção de transitórios são implementadas utilizando o MATLAB<sup>®</sup>, permitindo a elaboração de módulos localizadores de faltas baseados nos algoritmos descritos no tópico 4.1. Já para gerar os registros oscilográficos de cada caso de falta simulado no ATP, utilizou-se a linguagem MODELS do próprio ATP.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

Para se fazer a análise comparativa entre os métodos citados no tópico 2.1, foram realizadas simulações. Antes, porém, faz-se necessário a definição de alguns conceitos para determinação da precisão dos métodos, além de um estudo sobre compensação série capacitiva em LT.

### 4.1 COMPENSAÇÃO SÉRIE CAPACITIVA EM LT

Bancos de capacitores são, geralmente, instalados em série com linhas de transmissão com o objetivo de aumentar a capacidade de transmissão desta. Conforme apresentado em ANDERSON (1999), a instalação de bancos de capacitores em série com LT permite a compensação de parte da reatância indutiva desta, diminuindo a impedância equivalente e, conseqüentemente, promovendo uma transmissão de energia com menores índices de perdas. A compensação capacitiva pode ainda melhorar a estabilidade (transitória e de regime permanente) do SEP e a regulação da tensão ao longo do linha.

A instalação destes bancos de capacitores nas LT pode causar alguns efeitos negativos para os sistemas de proteção. De fato, a elaboração de algoritmos para proteção de LT com compensação série capacitiva tem sido enxergada como um problema (PHADKE & THORP, 2009), pois as características do sistema são alteradas e, por consequência, os esquemas de proteção se tornam mais complexos.

Normalmente, o banco de capacitores é inserido em apenas um terminal da linha, embora possa ser instalado no meio desta, ou mesmo nos dois terminais. Segundo apresentado em ANDERSON (1999), o grau da compensação (GC) capacitiva de uma dada LT pode ser expresso pela relação entre a reatância capacitiva inserida e a reatância indutiva total dos condutores, conforme apresentado na expressão (48) a seguir.

$$GC(\%) = \frac{X_C}{X_L} \cdot 100, \quad (48)$$

onde  $X_C$  e  $X_L$  são, respectivamente, a reatância capacitiva inserida em série com a LT e a reatância indutiva total da LT.

Segundo ANDERSON (1999), sabe-se que valores de GC entre 50% e 70% são os mais comuns em sistemas de transmissão, apesar de existirem no SIN, segundo dados na ANEEL, LT com valores diferentes de GC.

Quando se estuda a influência do GC na localização de faltas em LT, independentemente do valor que se adote para ele, sabe-se que a compensação capacitiva pode ocasionar erros nas estimativas do ponto de falta. Portanto, é perceptível a necessidade de considerar situações de compensação série capacitiva sob diferentes GC durante a análise dos desempenhos dos métodos de localização de faltas avaliados.

## 4.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A SIMULAÇÃO DE FALTAS E DE CONVERSORES A/D FAZENDO USO DO ATP

Uma representação confiável de falta em LT exige que os requisitos mínimos sejam atendidos durante a simulação do distúrbio no ATP. Os transitórios eletromagnéticos provenientes da ocorrência e eliminação de faltas em LT longas apresentam frequências dominantes na faixa entre 60 Hz e 20 kHz, segundo dados apresentados em CIGRE Digital Technical Brochure WG02-SC33 (1990). Logo, os passos de integração necessários para ser feita a simulação representativa das faltas em LT devem ter ordem de grandeza suficiente para contemplar toda a faixa de frequências mencionada.

O passo de integração deve ser igual a pelo menos um décimo do período do sinal transitório da maior frequência envolvida no fenômeno em estudo. Considerando a frequência máxima de 20 kHz mencionada anteriormente, utiliza-se neste trabalho um passo de integração igual a  $5\mu\text{s}$ , ou seja, um décimo do período de  $50\mu\text{s}$ . Com o intuito de garantir os requisitos mínimos mencionados em CIGRE Digital Technical Brochure WG02-SC33 (1990) para o estudo de faltas em LT, foi utilizado neste trabalho um passo de integração igual a  $1\mu\text{s}$ , o qual é cinco vezes menor que o valor mínimo exigido e que implica em sinais digitais com 16667 amostras por ciclo.

#### 4.2.1 CONVERSOR A/D SIMULADO PARA OS MÉTODOS TWFL

Os métodos TWFL exigem a detecção de componentes de alta frequência para que seus algoritmos sejam válidos na localização. Logo, foi utilizado neste trabalho um período de amostragem de 50  $\mu$ s, o que equivale a 334 amostras por ciclo na frequência fundamental. Desta forma, apenas a cada cinquenta iterações da simulação no ATP, os métodos TWFL são executados.

#### 4.2.2 CONVERSOR A/D SIMULADO PARA OS MÉTODOS BASEADOS NA ANÁLISE DE COMPONENTES DE FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL

Como nestes métodos apenas é utilizado as componentes em sua frequência fundamental, não foi necessário para a simulação altas taxas de amostragem. Sendo assim, foi utilizado neste trabalho um período de amostragem de aproximadamente 1,041 ms, o que equivale a 16 amostras por ciclo na frequência nominal do SEP. Portanto a cada 1041 iterações da simulação no ATP, os métodos baseados nos fasores fundamentais são executados apenas uma vez.

### 4.3 CÁLCULO DOS ERROS DAS LOCALIZAÇÕES DE FALTAS

O erro é um parâmetro fundamental na avaliação da precisão do método localizador de defeito na LT. Os erros podem ser definidos em dois tipos, descritos a seguir.

#### 4.3.1 ERRO ABSOLUTO (EA)

O erro absoluto é a diferença entre a distância do terminal ao ponto real de ocorrência do distúrbio e a distância do terminal local estimado pelo algoritmo localizador. Considera-se o EA como sendo o módulo da referida diferença, dado em quilômetros, conforme apresentado na expressão (49).

$$EA = |d_{real} - d_{estimada}| \quad (49)$$

onde  $d_{real}$  e  $d_{estimada}$  são, respectivamente, as localizações real e estimada, ambas dadas em quilômetros.

#### 4.3.2 ERRO RELATIVO (ER)

O erro relativo admite uma avaliação da precisão dos métodos de localização de faltas aplicados às LT com diferentes comprimentos. Este parâmetro é percentual, sendo proporcional à razão entre o EA e o comprimento  $l$  da LT monitorada. Na expressão (50) é apresentada a fórmula para cálculo do ER.

$$ER = \frac{|d_{real} - d_{estimada}|}{l} \cdot 100, \quad (50)$$

onde  $l$  é o comprimento da LT na qual ocorreu a falta.

#### 4.3.3 ERRO ADMISSÍVEL PARA OS MÉTODOS TWFL

De acordo com dados apresentados em RTDS Technologies Inc. (2008), o desvio máximo esperado, em módulo, para as localizações das faltas é proporcional à metade do período de amostragem  $\Delta t$ , conforme apresentado na expressão (51).

$$|e| \approx \frac{\Delta t \cdot c}{2}, \quad (51)$$

em que  $e$  representa a tolerância de erro admissível para a localização da falta,  $\Delta t$  é o período de amostragem adotado e  $c$  é a velocidade da luz (300.000 km/s).

Com o período de amostragem de 50  $\mu$ s, a tolerância para o erro é de 7,5 km. Logo, simulações que apresentem desvios, em módulo, abaixo de 7,5 km podem ser consideradas bem sucedidas, já que a localização da falta foi satisfatória.

### 4.4 SIMULAÇÃO DE FALTAS EM LT

Para avaliação das potencialidades e limitações dos algoritmos estudados a partir da análise da influência das características de falta, da configuração do sistema elétrico de potência, de imprecisões nos parâmetros da LT e compensação série capacitiva sobre a precisão e confiabilidade dos métodos, foi utilizada uma linha fictícia de 230 kV, com dois terminais e 400 km de extensão. Este sistema tem seu diagrama unifilar mostrado na Figura 14, e seus dados apresentados no apêndice A.

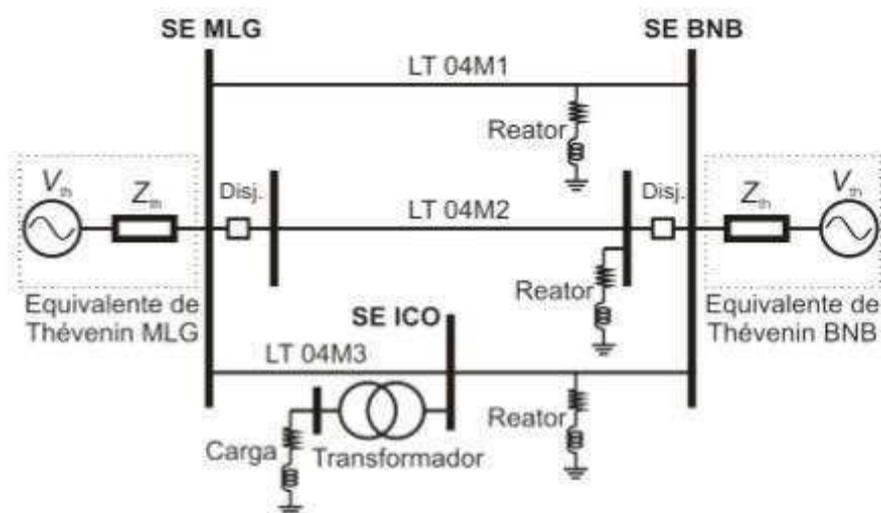
Figura 14 – Diagrama unifilar da linha de transmissão de 230 kV, LT FICT, entre as subestações SE B1 e SE B2.



Fonte: Próprio autor.

Para a realização das simulações com dados reais da Linha de transmissão foram utilizados os dados da LT Milagres–Banabuiú (LT MLG–BNB) do sistema Chesf, que opera com 230kV de tensão e tem comprimento de 225,2 quilômetros e seu diagrama unifilar é apresentado na Figura 15. Foi utilizada também a LT Colinas–R. Gonçalves (LT COL–RGO), seu diagrama unifilar está representado no SEP no apêndice A. Dados mais detalhados das LT simuladas estão expressos no apêndice A.

Figura 15 – Diagrama unifilar de parte do SIN referente ao SEP no qual se encontra instalada a linha de 230 kV, LT 04M2, entre as subestações Milagres (SE MLG) e Banabuiú (SE BNB).



Fonte: CARVALHO Jr., 2008.

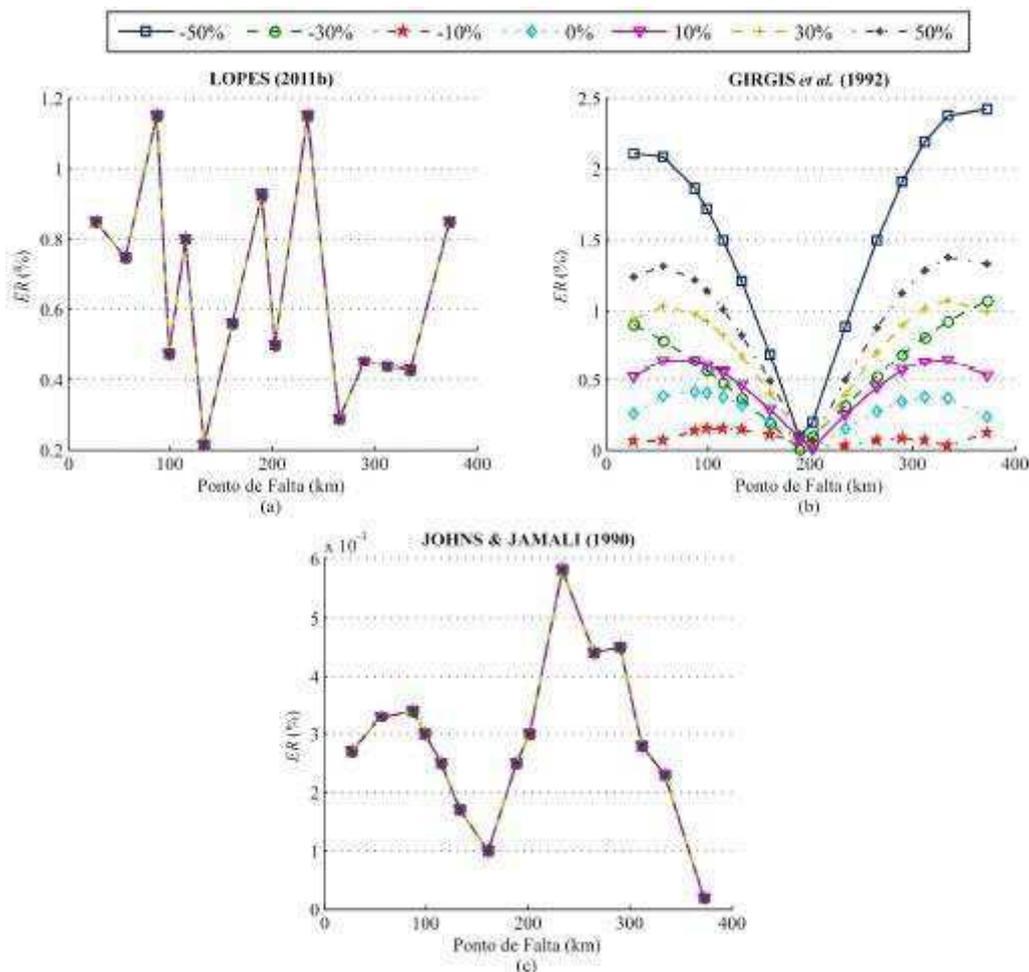
## 4.5 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE IMPRECIÇÕES NOS PARÂMETROS DA LT

As concessionárias de energia elétrica possuem os valores de comprimento e parâmetros de sequência positiva e sequência zero das LT que pertencem aos seus SEP.

Porém estes dados são provenientes de medições, que são sujeitas a erros, ou de valores adotados como padrão. Tais imprecisões nos parâmetros podem causar erros na análise de dados para localização de faltas em LT.

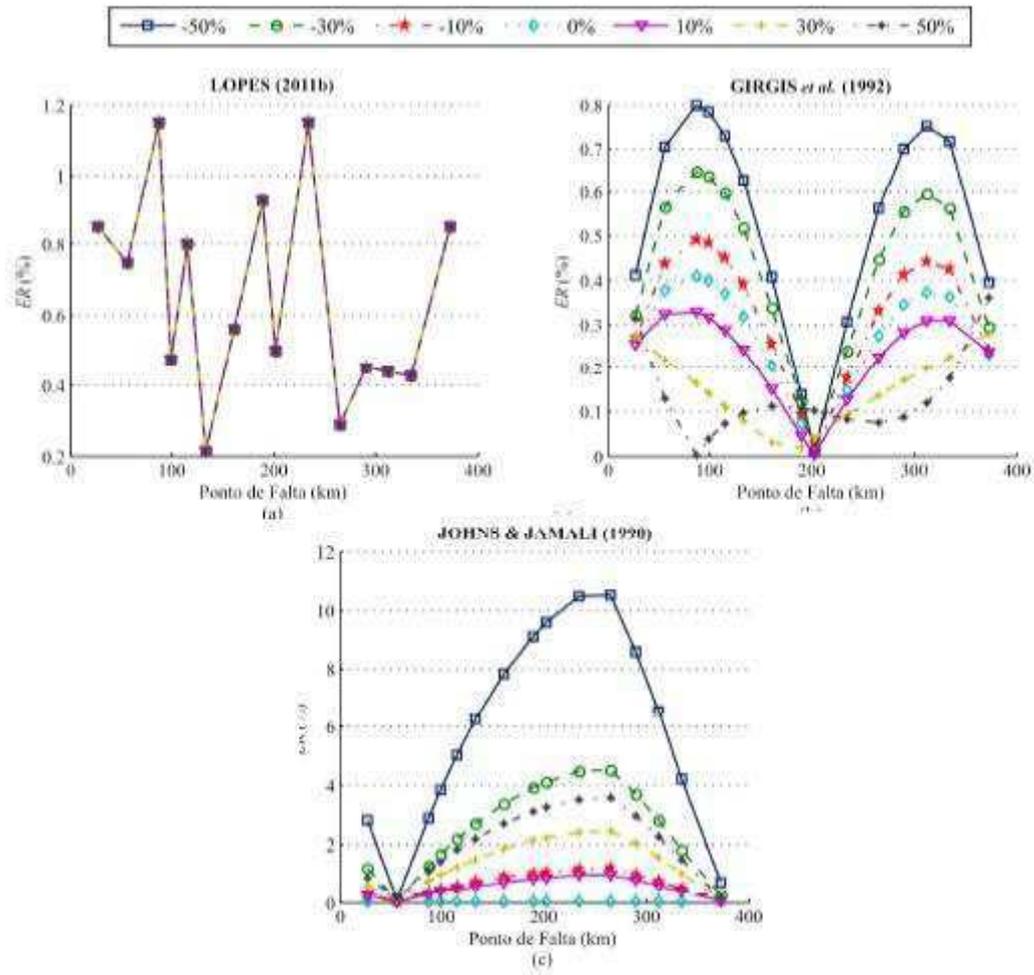
Portanto, nesta etapa serão realizadas simulações que consigam obter resultados provenientes do funcionamento dos algoritmos estudados com imprecisão nos parâmetro da LT. Desta forma, as simulações serão realizadas com variações de  $\pm 1\%$ ,  $\pm 5\%$  e  $\pm 10\%$  do comprimento total dos condutores. Além de serem simuladas situações dos parâmetros da LT com variações de  $\pm 10\%$ ,  $\pm 30\%$  e  $\pm 50\%$  dos valores reais utilizados na modelagem das LT no ATP. Nas Figuras 16, 17 e 18 são apresentados os resultados das simulações de faltas AT na LT FICT com resistências de falta iguais a  $1\Omega$  e ângulo de incidência de  $90^\circ$ , variando apenas o ponto de falta e as imprecisões no comprimento e nos parâmetros de sequência positiva e zero da LT.

Figura 16 – Análise da influência de imprecisões nos parâmetros de sequência zero ( $Z_{L0}$ ) da LT: (a) LOPES (2011b); (b) GIRGIS *et al.* (1992); (c) JOHNS & JAMALI (1990).



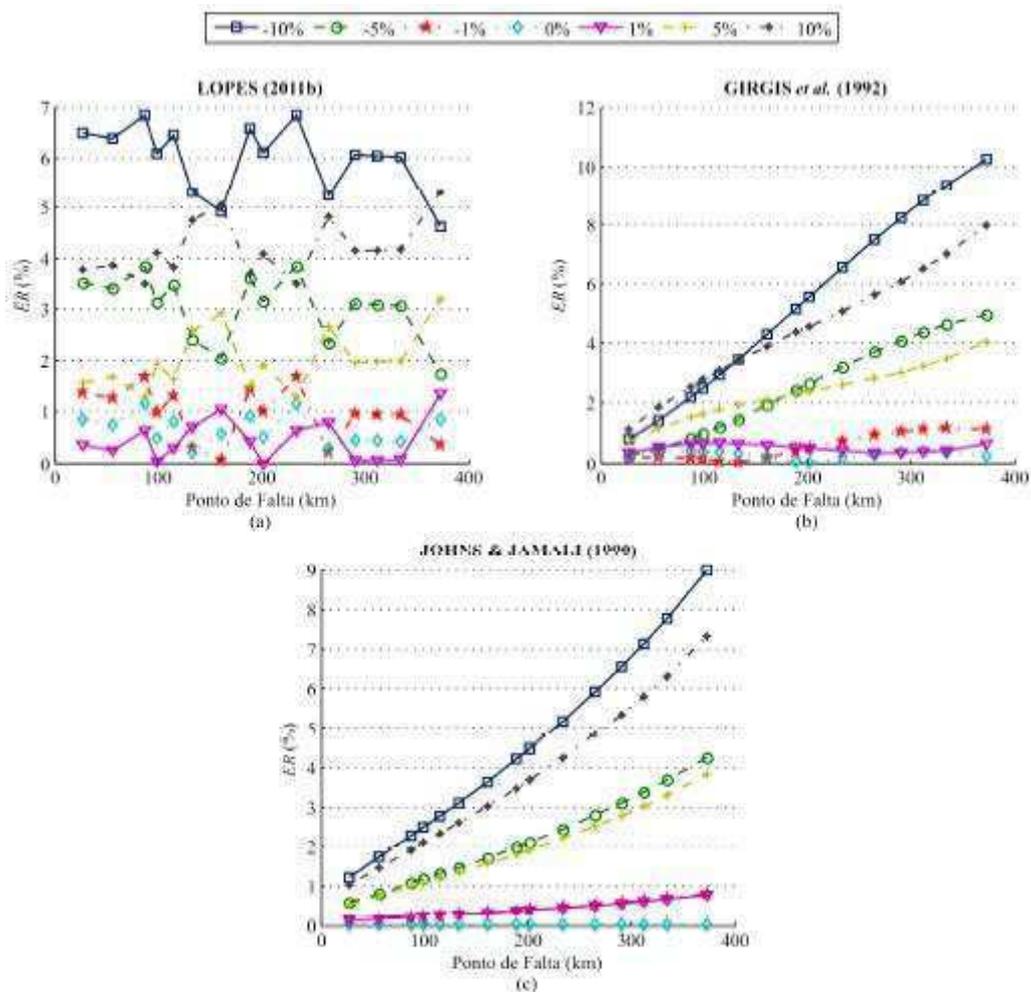
Fonte: Próprio autor.

Figura 17 – Análise da influência de imprecisões nos parâmetros de sequência positiva ( $Z_{L1}$ ) da LT: (a) LOPES (2011b); (b) GIRGIS *et al.* (1992); (c) JOHNS & JAMALI (1990).



Fonte: Próprio autor.

Figura 18 – Análise da influência de imprecisões no comprimento L da LT: (a) LOPES (2011b); (b) GIRGIS *et al.* (1992); (c) JOHNS & JAMALI (1990).



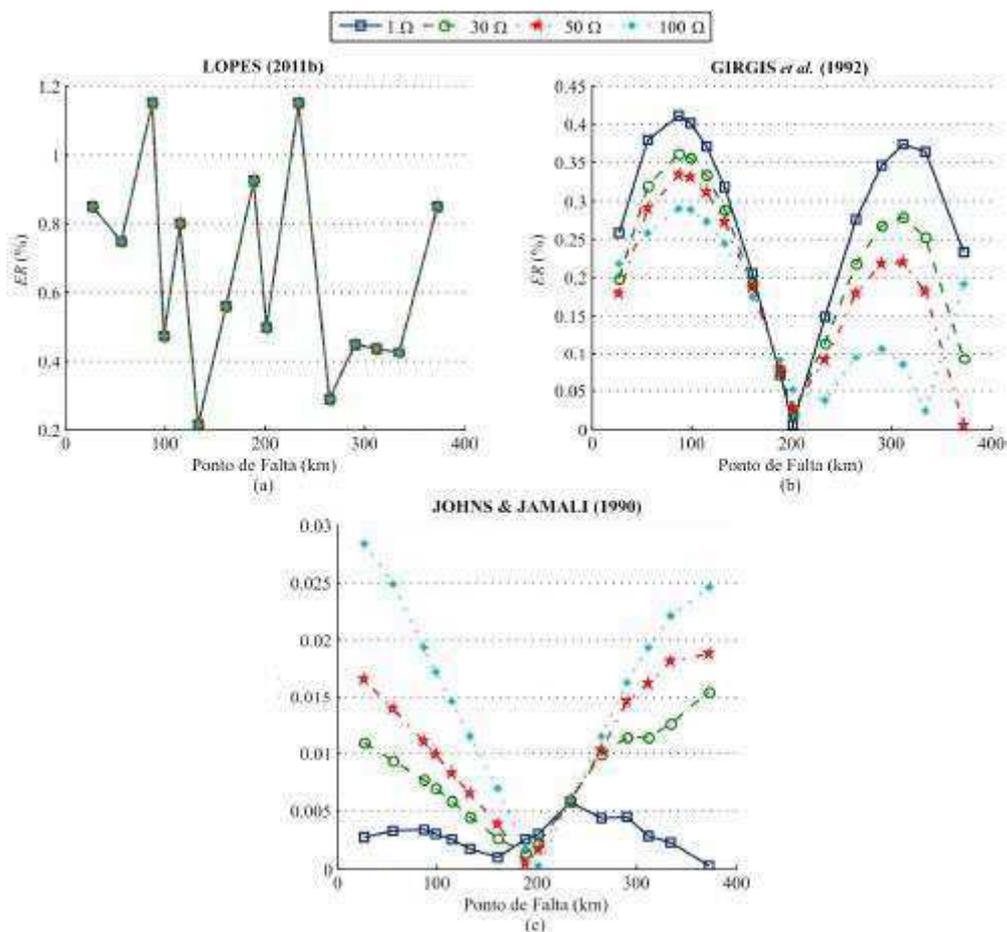
Fonte: Próprio autor.

Quando se analisa a influência de imprecisões nos parâmetros de sequência zero percebe-se que os métodos de LOPES (2011b) e JOHNS & JAMALI (1990) não apresentaram sensibilidade à variação destes parâmetros. Já quando se analisa imprecisões nos parâmetros de sequência positiva, é perceptível que apenas o método de LOPES (2011b) manteve seu comportamento sem variações, no entanto é perceptível que o método GIRGIS *et al.* (1992) apresentou pouca sensibilidade à variação nos parâmetros de sequência positiva. Nos casos em que o valor do comprimento da LT não foi obtido de forma precisa resultaram em variações nos desempenhos dos três métodos. Sendo assim, pode-se concluir que a obtenção de valores precisos para determinação dos comprimentos das LT é de suma importância, uma vez que todos os métodos têm seu desempenho comprometido quando há imprecisão no valor do comprimento da LT.

## 4.6 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS DA FALTA

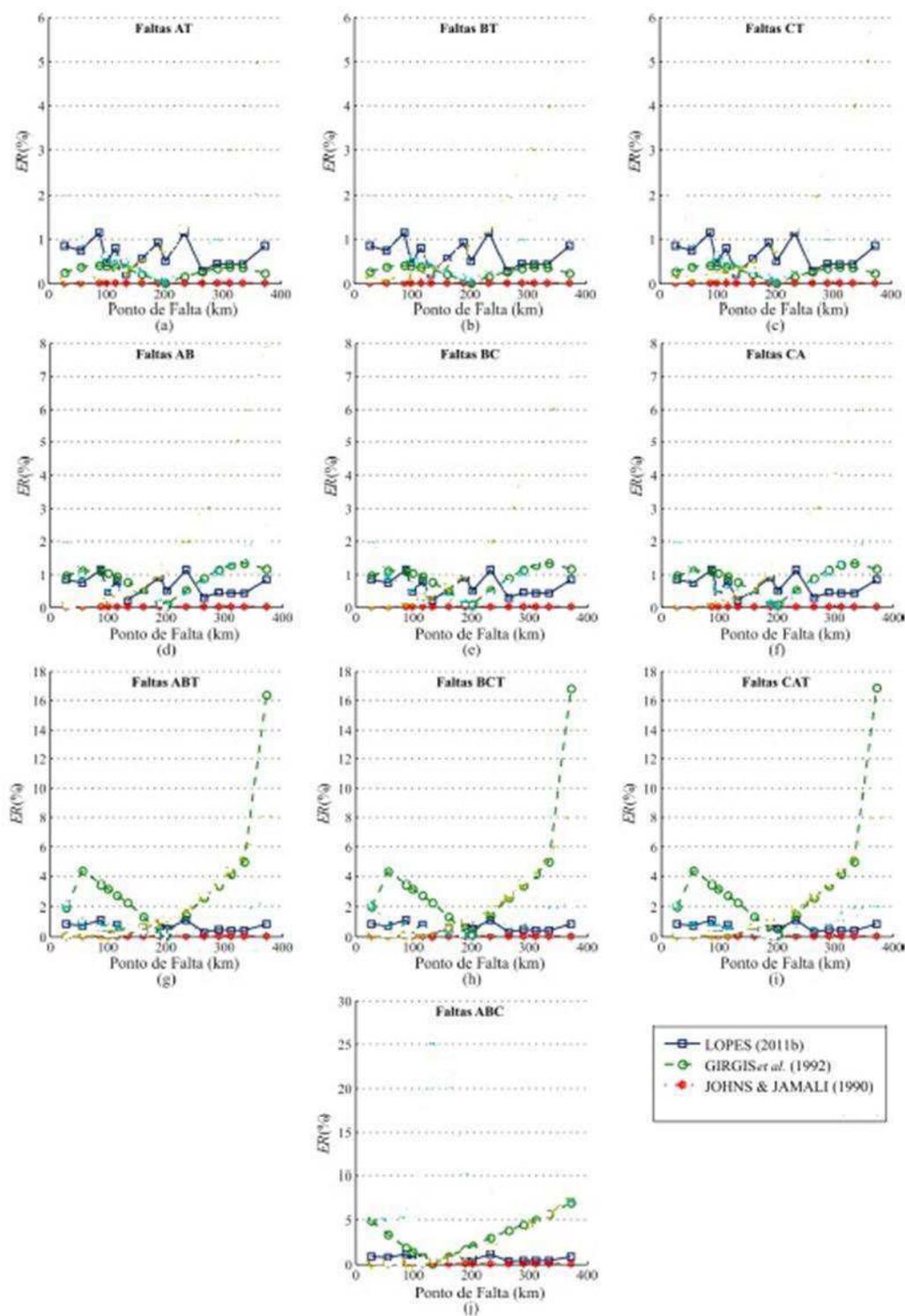
Na mesma linha analisada na etapa anterior foram feitas simulações variando o tipo de falta ocorrida na LT. Foram simuladas faltas com a impedância variando entre os valores  $1\Omega$ ,  $30\Omega$ ,  $50\Omega$  e  $100\Omega$ , como apresentado na Figura 19. Em seguida foram realizadas simulações com as faltas dos tipos: AT, BT, CT, AB, CA, BC, ABT, BCT, CAT e ABC, como mostrado na Figura 20. Ainda foi verificado o desempenho variando o ângulo de incidência da falta entre  $0^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $70^\circ$  e  $90^\circ$ , e agrupado os resultados na Figura 21.

Figura 19 – Análise da influência da resistência de falta: (a) LOPES (2011b); (b) GIRGIS et al. (1992); (c) JOHNS & JAMALI (1990).



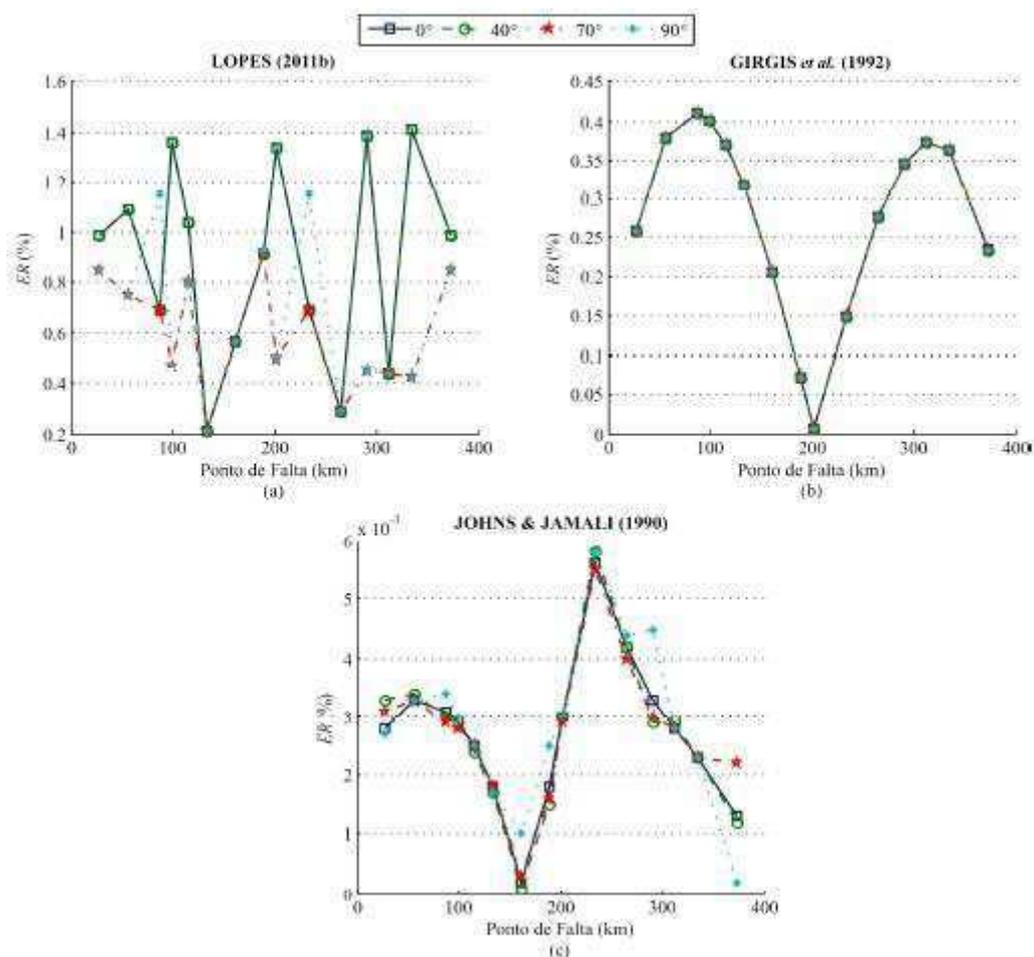
Fonte: Próprio autor.

Figura 20 – Análise da influência do tipo de falta: (a) AT; (b) BT; (c) CT; (d) AB; (e) BC; (f) AC; (g) ABT; (h) BCT; (i) ACT; (j) ABC.



Fonte: Próprio autor.

Figura 21 – Análise da influência do ângulo de incidência da falta: (a) LOPES (2011b); (b) GIRGIS *et al.* (1992); (c) JOHNS & JAMALI (1990).



Fonte: Próprio autor.

Na análise do tipo de falta é possível perceber que o algoritmo JOHNS & JAMALI (1990) apresentou o melhor resultado, pois seus erros relativos foram menores. Vale destacar ainda o bom desempenho do método LOPES (2011b) e o desempenho não muito satisfatório do método GIRGIS *et al.* (1992) quando a falta ocorreu próximo aos terminais da LT, uma vez que seus erros relativos são consideravelmente grandes para alguns tipos de falta, principalmente no caso das faltas bifásicas-terra.

Quando é feita a análise da resistência da falta sobre o desempenho dos métodos, verifica-se que os métodos estudados não são muito afetados quando a resistência de falta varia, já que apresentam variações muito pequenas ou não apresentam variações, como o método LOPES (2011b).

Quando foram realizadas simulações variando o ângulo de falta, foi notado que o método GIRGIS *et al.* (1992) não sofreu alterações quando este parâmetro foi variado. Porém as alterações percebidas nos outros dois métodos foram muito pequenas.

#### 4.7 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA COMPENSAÇÃO SÉRIE CAPACITIVA DE LT

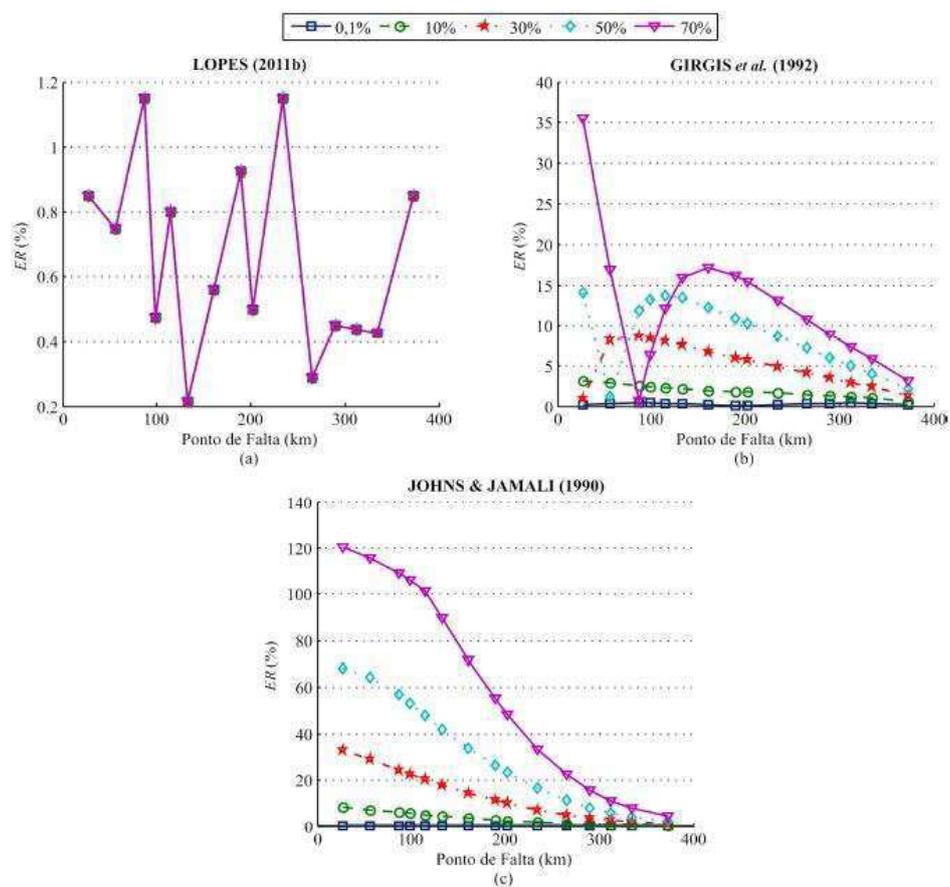
A instalação de bancos de capacitores provoca alterações nos perfis de tensão e corrente devido à modificação da impedância equivalente, causando erro nos sistemas localizadores de falta.

Como mencionado anteriormente na seção 4.1, os valores mais comuns de  $GC$  se localizam entre os valores de 50% e 70%, porém na prática podemos encontrar valores diferentes dos mencionados nesta faixa. Com o objetivo de avaliar a compensação capacitiva nos métodos foram considerados  $GC$  iguais a 0,1% (quase não compensada), 10%, 30%, 50% e 70%.

Além disto, foi levada outra consideração acerca das simulações apresentadas na seção 4.1, são considerados os casos com compensação em um e dois terminais, configurações bastante utilizadas nos sistemas de transmissão.

Para viabilizar a análise da influência da compensação série capacitiva de LT sobre os métodos de localização de faltas implementados, foram realizadas simulações na LT FICT compensada em um terminal e em dois terminais, conforme detalhado no apêndice A. As faltas simuladas no ATP são do tipo AT, com resistências de falta iguais a  $1\Omega$  e ângulos de incidência de  $90^\circ$  para isentar as avaliações desta etapa da influência exercida pelas características de falta. Os resultados das simulações estão expostos a seguir nas Figuras 22 e 23.

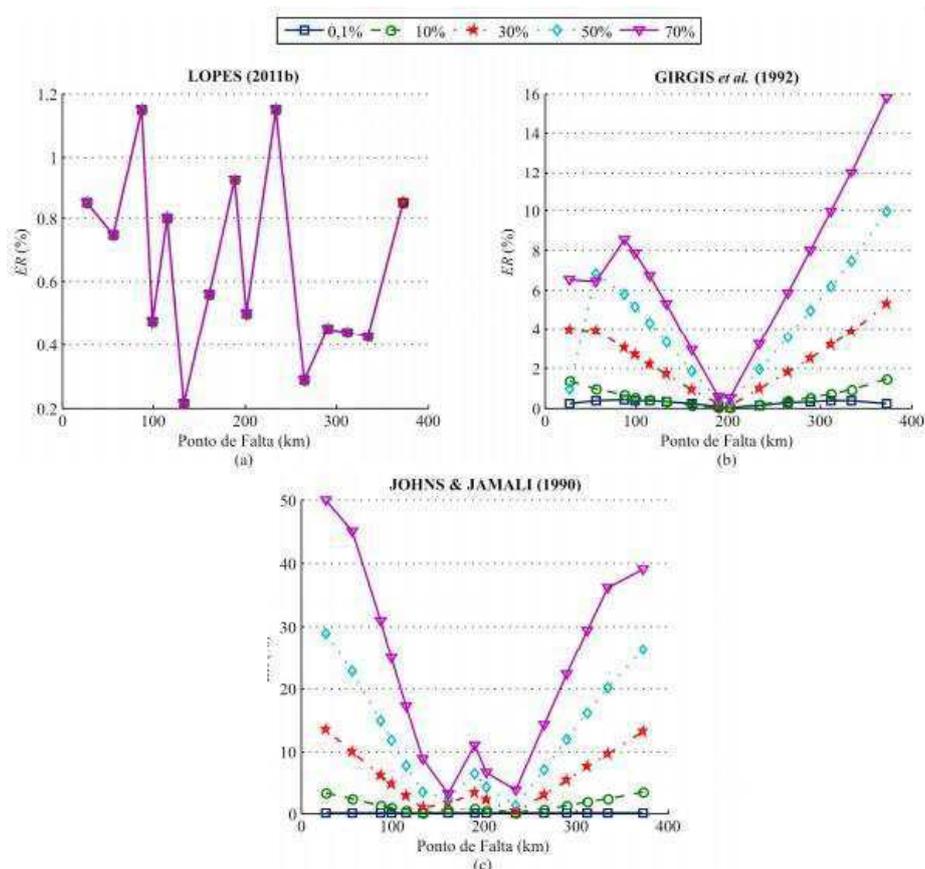
Figura 22 – Análise da compensação série capacitiva instalada em 1 terminal da LT: (a) LOPES (2011b); (b) GIRGIS *et al.* (1992); (c) JOHNS & JAMALI (1990).



Fonte: Próprio autor.

É possível perceber em ambos os casos que apenas o método LOPES (2011b) se manteve inalterado quando a linha foi compensada, enquanto os outros dois métodos apresentaram erros muito elevados.

Figura 23 – Análise da compensação série capacitiva instalada em 2 terminais da LT: (a) LOPES (2011b); (b) GIRGIS *et al.* (1992); (c) JOHNS & JAMALI (1990).



Fonte: Próprio autor.

Quando a LT FICT foi compensada em apenas um terminal os desvios apresentados pelos algoritmos de GIRGIS *et al.* (1992), JOHNS & JAMALI (1990) apresentaram crescimento conforme se aumentou o GC. Os dois métodos apresentaram também um índice de erro relativo menor quando as faltas foram simuladas próximas ao terminal em que se encontra o banco de capacitores.

Considerando as simulações com a linha compensada nos dois terminais, percebe-se que os desvios são mais relevantes para faltas próximas aos dois terminais, enquanto que para casos de faltas próximas ao centro da LT (em torno de 200 km), os erros são menores, para os métodos de GIRGIS *et al.* (1992) e JOHNS & JAMALI (1990).

É nítida a confiabilidade apresentada pelo método LOPES (2011b) para LT compensadas, visto que em ambos os casos seu desempenho não foi alterado quando se alterou o GC, sendo o único a apresentar estes resultados.

## 4.8 SIMULAÇÃO DE FALTAS LT REAIS COM E SEM COMPENSAÇÃO SÉRIE CAPACITIVA

Para realização de simulações foram utilizados dados reais da linha de transmissão Milagres–Banabuiú (LTMLG–BNB) do sistema Chesf. Como a LT MLG–BNB não possui compensação série capacitiva, foi escolhida a LT Colinas–R. Gonçalves (LT COL–RGO) para simulação das faltas em LT compensadas, que possui  $GC$  igual a 48%. Em seguida, foram definidas as características das faltas para realização das simulações, variando o ângulo de incidência da falta, o tipo de falta, a resistência da falta e a localização, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Características de falta adotadas durante a simulação de faltas nas LT reais avaliadas.

LT	Parâmetros de Falta Variados	Valores Determinados	Número de Possibilidades
MLG–BNB	Localização da Falta (km)	27, 56, 87, 99, 115, 133, 161, 189, 202, e 216	10
	Resistência de falta ( $\Omega$ )	1, 30, 50 e 100	4
	Ângulo de incidência ( $^\circ$ )	0, 40, 70, 90, 110, 140 e 180	7
	Tipo de falta	AT-BT-CT-AB-AC-BC-ABT-ACT-BCT-ABC	10
COL–RGO	Localização da Falta (km)	27, 56, 87, 99, 115, 133, 161, 189, 202, 234, 265, 290, 312, 334 e 352	15
	Resistência de falta ( $\Omega$ )	1, 30, 50 e 100	4
	Ângulo de incidência ( $^\circ$ )	0, 40, 70, 90, 110, 140 e 180	7
	Tipo de falta	AT-BT-CT-AB-AC-BC-ABT-ACT-BCT-ABC	10
Total de Casos		Analisados	
MLG–BNB:			2800
COL–RGO:			4200

Fonte: Próprio autor.

Nas Tabelas 3, 4 e 5 são apresentados, respectivamente, os resultados das simulações envolvendo as LT anteriormente mencionadas, para os métodos LOPES (2011b) GIRGIS *et al.* (1992) e JOHNS & JAMALI (1990).

Tabela 3 – Localização de faltas em LT reais considerando o algoritmo de LOPES (2011b).

Método avaliado: LOPES (2011b)								
Tipo de falta	$\mu_{ER}$ = Média dos erros relativos <i>ER</i> .				$\sigma_{ER}$ = Desvio padrão dos erros relativos <i>ER</i> .			
	$\mu_{EA}$ = Média dos erros absolutos <i>EA</i> .				$\sigma_{EA}$ = Desvio padrão dos erros absolutos <i>EA</i> .			
	LT analisada							
	LT MLG-BNB (sem compensação)				LT COL-RGO (48% compensada)			
	$\mu_{ER}$ (%)	$\sigma_{ER}$ (%)	$\mu_{EA}$ (km)	$\sigma_{EA}$ (km)	$\mu_{ER}$ (%)	$\sigma_{ER}$ (%)	$\mu_{EA}$ (km)	$\sigma_{EA}$ (km)
AT	1,41	1,05	3,17	2,36	0,69	0,60	2,60	2,27
BT	1,36	0,82	3,05	1,85	0,68	0,56	2,58	2,12
CT	1,45	1,20	3,26	2,70	0,70	0,58	2,65	2,20
AB	1,22	0,70	2,74	1,58	0,69	0,57	2,62	2,16
BC	1,41	1,11	3,18	2,51	0,69	0,56	2,60	2,10
AC	1,38	1,06	3,10	2,38	0,67	0,55	2,52	2,07
ABT	1,26	0,72	2,84	1,61	0,70	0,56	2,64	2,11
BCT	1,26	0,72	2,85	1,62	0,69	0,55	2,62	2,10
ACT	1,26	0,72	2,84	1,61	0,70	0,55	2,64	2,10
ABC	1,95	1,32	4,40	2,97	0,66	0,54	2,51	2,04
<b>Média Final:</b>	<b>1,40</b>	<b>0,94</b>	<b>3,14</b>	<b>2,12</b>	<b>0,69</b>	<b>0,56</b>	<b>2,60</b>	<b>2,13</b>

Fonte: Próprio autor.

Tabela 4 – Localização de faltas em LT reais considerando o algoritmo de GIRGIS *et al.* (1992).

Método avaliado: GIRGIS <i>et al.</i> (1992)								
Tipo de falta	$\mu_{ER}$ = Média dos erros relativos <i>ER</i> .				$\sigma_{ER}$ = Desvio padrão dos erros relativos <i>ER</i> .			
	$\mu_{EA}$ = Média dos erros absolutos <i>EA</i> .				$\sigma_{EA}$ = Desvio padrão dos erros absolutos <i>EA</i> .			
	LT analisada							
	LT MLG-BNB (sem compensação)				LT COL-RGO (48% compensada)			
	$\mu_{ER}$ (%)	$\sigma_{ER}$ (%)	$\mu_{EA}$ (km)	$\sigma_{EA}$ (km)	$\mu_{ER}$ (%)	$\sigma_{ER}$ (%)	$\mu_{EA}$ (km)	$\sigma_{EA}$ (km)
AT	0,20	0,22	0,46	0,49	11,30	8,54	42,82	32,36
BT	0,20	0,22	0,46	0,49	11,30	8,54	42,82	32,36
CT	0,20	0,22	0,46	0,49	11,30	8,54	42,81	32,36
AB	0,89	0,83	1,99	1,86	9,09	7,68	34,46	29,11
BC	0,88	0,82	1,99	1,86	9,09	7,68	34,45	29,11
AC	0,88	0,82	1,99	1,86	9,09	7,69	34,46	29,14
ABT	0,59	0,79	1,34	1,77	5,61	3,52	21,28	13,34
BCT	0,59	0,78	1,33	1,76	5,58	3,44	21,16	13,04
ACT	0,59	0,79	1,34	1,77	5,61	3,54	21,28	13,42
ABC	7,64	4,63	17,20	10,43	36,60	19,42	138,71	73,62
<b>Média Final:</b>	<b>1,27</b>	<b>1,01</b>	<b>2,85</b>	<b>2,28</b>	<b>11,46</b>	<b>7,86</b>	<b>43,42</b>	<b>29,78</b>

Fonte: Próprio autor.

Tabela 5 – Localização de faltas em LT reais considerando o algoritmo de JOHNS &amp; JAMALI (1990).

Método avaliado: JOHNS & JAMALI (1990)								
Tipo de falta	$\mu_{ER}$ = Média dos erros relativos ER. $\mu_{EA}$ = Média dos erros absolutos EA.				$\sigma_{ER}$ = Desvio padrão dos erros relativos ER. $\sigma_{EA}$ = Desvio padrão dos erros absolutos EA.			
	LT analisada							
	LT MLG-BNB (sem compensação)				LT COL-RGO (48% compensada)			
	$\mu_{ER}$ (%)	$\sigma_{ER}$ (%)	$\mu_{EA}$ (km)	$\sigma_{EA}$ (km)	$\mu_{ER}$ (%)	$\sigma_{ER}$ (%)	$\mu_{EA}$ (km)	$\sigma_{EA}$ (km)
AT	0,82	0,69	1,85	1,57	96,42	27,47	365,45	104,11
BT	0,89	0,72	2,00	1,63	28,12	19,69	106,58	74,61
CT	0,72	0,69	1,63	1,56	76,58	29,99	290,22	113,66
AB	0,22	0,22	0,49	0,49	15,00	10,14	56,86	38,41
BC	0,26	0,24	0,59	0,53	20,47	11,94	77,60	45,27
AC	0,29	0,25	0,66	0,56	4,52	3,88	17,13	14,72
ABT	0,09	0,06	0,20	0,14	7,14	3,19	27,05	12,08
BCT	0,10	0,07	0,22	0,15	8,83	3,43	33,46	12,99
ACT	0,12	0,08	0,26	0,17	4,23	4,14	16,04	15,68
ABC	0,24	0,19	0,53	0,42	4,23	2,99	16,03	11,31
<b>Média Final:</b>	<b>0,37</b>	<b>0,32</b>	<b>0,84</b>	<b>0,72</b>	<b>26,55</b>	<b>11,68</b>	<b>100,64</b>	<b>44,28</b>

Fonte: Próprio autor.

Em que:  $\mu_{ER}$  = Média dos erros relativos ER.

$\mu_{EA}$  = Média dos erros absolutos EA.

$\sigma_{ER}$  = Desvio padrão dos erros absolutos ER.

$\sigma_{EA}$  = Desvio padrão dos erros absolutos EA.

Podemos comprovar que o método LOPES (2011b) manteve o bom desempenho quando a LT é compensada, como vimos nos estudos da seção 6.7. Outra conclusão pode ser vista a partir destes resultados, é que o método LOPES (2011b) teve em todos os casos a média dos erros absolutos ( $\mu_{EA}$ ) menores que 7,5 quilômetros, valor este determinado como valor máximo admissível para considerar uma falta bem sucedida, sendo assim todas as localizações feitas usando este método mostra que ele demonstrou muita eficiência ao realizá-las de forma satisfatória.

Os resultados da Tabela 4 permite a conclusão que o método GIRGIS *et al.* (1992) apresenta resultados muito bons para localizações na LT MLG-BNB, tendo seu resultado piorado consideravelmente quando as simulações foram feitas com uma linha compensada. Percebe-se também que este método apresentou resultados insatisfatórios para faltas trifásicas, quando seus erros de localização diferiram do padrão de erros para outros tipos de falta.

O método JOHNS & JAMALI (1990) teve seu desempenho considerado como melhor dos três métodos, quando as simulações foram feitas em LT não compensadas. Assim como o método GIRGIS *et al.* (1992), esse método apresentou resultados não satisfatórios quando foi considerada a localização em uma LT compensada.

## 5 CONCLUSÃO

Após a revisão bibliográfica de trabalhos publicados sobre o assunto de localização de faltas em linhas de transmissão, foram verificados diversos métodos e analisados os mais convenientes para o cálculo da localização de faltas em linhas de transmissão.

Uma breve descrição dos métodos utilizados neste trabalho foi realizada com o intuito de descrevê-los para serem realizadas simulações e obter parâmetros que possibilitassem uma avaliação comparativa entre estes. Tais métodos foram escolhidos de forma que se tenha variedade nos algoritmos utilizados na localização, que apresentem boa confiabilidade e que sejam consolidados no cálculo da estimativa do ponto de falta em LT.

O processo da estimação de fasores foi abordado, desde a amostragem dos sinais da rede com a conversão A/D, janelamento de sinais e filtragem destes, para determinação de fasores utilizados em alguns dos métodos selecionados para análise comparativa.

As considerações sobre as simulações foram determinadas para uma simulação confiável de distúrbios nas LT. Após definidos os conceitos e critérios para a análise, foram realizadas simulações utilizando os algoritmos dos métodos selecionados, a saber, os métodos de LOPES (2011b), GIRGIS *et al.* (1992) e JOHNS & JAMALI (1990), e verificado que estes apresentam bom desempenho para localização de faltas em LT.

Na análise, percebeu-se que o método de LOPES (2011b) apresentou comportamento quase inalterado quando se tem imprecisão nos parâmetros da LT, mudando seu resultado apenas quando o comprimento da linha não era bem determinado. Para análise das características de falta, percebeu-se que este método apresentou bastante robustez também, visto que suas variações foram pequenas para mudanças nas características de falta. O método de LOPES (2011b) apresentou ainda grande robustez quando foi adicionada a compensação série capacitiva. Já o método de GIRGIS *et al.* (1992) não sofreu alterações quando se variou o ângulo de incidência da falta, porém na variação de alguns parâmetros apresentou grande sensibilidade. Ao adicionar compensação série capacitiva, o método de GIRGIS *et al.* (1992) se mostrou

ineficaz, pois seus resultados foram muito influenciados pela compensação capacitiva. O método de JOHNS & JAMALI (1990) teve variações desprezíveis quando se variou o tipo de falta, mas apresentou sensibilidade quando houve variação em alguns outros parâmetros. O método de JOHNS & JAMALI (1990) mostrou ter melhor precisão que os outros métodos comparados quando a LT não era compensada, porém seu desempenho não foi satisfatório frente à adição de compensadores série capacitivos nas LT.

Constata-se, dessa forma, que os métodos analisados apresentaram, de uma forma geral, bom desempenho para localização de faltas em linhas de transmissão, ressaltando que cada um deles se mostrou mais adequado em uma determinada situação analisada. Porém, foi verificado que quando usado para LT compensadas, o método de LOPES (2011b) foi o único que não apresentou qualquer desvio nos seus resultados provocados pela compensação série capacitiva, sendo assim, ele deve ser preferido aos outros métodos nessa situação.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, P. M. *Power System Protection*. Piscataway, New Jersey, USA: IEEE Press Series on Power Engineering, 1999.
- BENMOUYAL, G. “Removal of DC-Offset in Current Waveforms Using Digital Mimic Filtering”. *IEEE Transactionson Power Delivery*, v. 10, n. 2, p. 621–630, April 1995.
- CARVALHO Jr., A. V. *Interação Transitória entre Transformadores de Potencial Capacitivos e Linhas de Transmissão: Uma Contribuição para Minimizar Falhas*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE, agosto 2008.
- CIGRE Digital Technical Brochure WG02-SC33. *Guidelines for Representation of Network Elements When Calculating Transients*. 21, Rue d’Artois FR-75 008 Paris, 1990.
- COSTA, F. B., SOUZA, B. A., BRITO, N. S. D., SILVA, K. M. “Transformada Wavelet Discreta Aplicada ao Diagnóstico de Distúrbios”. *III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE 2010*, Belém-PA, Brasil, 18-21 de maio, 2010.
- COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. *Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: dos Relés Eletromecânicos aos Microprocessados Inteligentes*. São Carlos: Edgard USP, 2007.
- DOMMEL, H. W., MICHELS, J. “High-speed Relaying Using Travelling Wave Transient Analysis”. *IEEE Conference*, Paper No. A78, pp. 214-219, January/February 1978.
- DUBE, L. “*Models in ATP: Language Manual*”, [S.l.], 1996.
- FENG, Z., JUN, L., LI, Z., ZHIHAO, Y. “A New Fault Location Method Avoiding Wave Speed and Based on Traveling Waves for EHV Transmission Line”. *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies - DRPT 2008*, Nanjing, China, April 6-9, 2008.

- GALE, P. F., CROSSLEY, P. A., XU BINGYIN GE YAOZHONG CORY, B. J., BARKER, J. R. G. "Fault Location Based on Travelling Waves". *Fifth International Conference on Developments in Power System Protection*, pp. 54-59, New York, 1993.
- GIRGIS, A. M., HART, D. G., PETERSON, W. L. "A New Fault Location Technique for Two and Three-Terminal Lines". *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 7, No. 1, pp. 98-107, January 1992.
- JAMALI, S., GHEZELJEH, A. "Fault Location on Transmission Line Using High Frequency Travelling Waves". *International Conference on Developments in Power System Protection*, Vol. 1, pp. 220-223, April 5-8, 2004.
- JIAN, Q., XIANGXUN, C., JIANCHAO, Z. "Travelling Wave Fault Location of Transmission Line Using Wavelet Transform". *International Conference on Power System Technology - POWERCON'98*, Vol. 1, pp. 533-537, Beijing, China, 18-21 August, 1998.
- JOHNS, A. T.; JAMALI, S. "Accurate Fault Location Technique for Power Transmission Lines". *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, vol. 137, No. 6, pp. 395-402, November 1990.
- LEUVEN EMTP CENTER, *ATP - Alternative Transients Program: Rule Book*. Heverlee, Belgium, July 1987.
- LIMA, H. B.; SILVA, W. P.; FERNANDES Jr., D. "Localização Automática de Faltas em Sistemas de Transmissão Baseada na Teoria de Ondas Viajantes". *V Encontro do Grupo de Sistemas Elétricos - EGSE 2016*, Campina Grande-PB, Brasil, 18-19 de fevereiro, 2016.
- LIN, D., JUN P., WENXIA, S., JUN, T., JUN, Z. "Fault Location for Transmission Line Based on Traveling Waves Using Correlation Analysis Method". *International Conference on High Voltage Engineering and Application*, Chongqing, China, November 9-13, 2008.
- LOPES, F. V. *Localização de Faltas em Linhas de Transmissão Baseada em Ondas Viajantes*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, março 2011a.

- LOPES, F. V. *Localização Automática de Falhas em Sistemas de Transmissão Baseada na Teoria de Ondas Viajantes*. Projeto e Pesquisa 1 Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, novembro 2011b.
- LOPES, F. V. *Análise Comparativa entre Métodos Utilizados na Localização de Falhas em Linhas de Transmissão*. Projeto e Pesquisa 2 Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, abril 2012.
- PHADKE, A. G., THORP, J. S. *Computer Relaying for Power Systems*. 2nd Edition, New York, USA: John Willey & Sons Inc, 2009.
- RADOJEVIC, Z. M., KIM, C. H., POPOV, M., PRESTON, G., TERZIJA, V. “New Approach for Fault Location on Transmission Lines Not Requiring Line Parameters”. *International Conference on Power Systems Transients, IPST 2009*, Kyoto, Japan, June 3-6, 2009.
- RTDS Technologies Inc. Real Time Digital Simulator Tutorial Manual (RSCAD Version). March 2008.
- SANTOSO, S., POWERS, E. J., HOFMANN, P. “Power Quality Assessment via Wavelet Transform Analysis”. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11(2): 924-930, 1996.
- SILVA, K. M. *Estimação de Fasores Baseada na Transformada Wavelet para Uso na Proteção de Distância de Linhas de Transmissão*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, abril 2009.
- 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*, Vol. PAS-101, No. 8, August 1982.



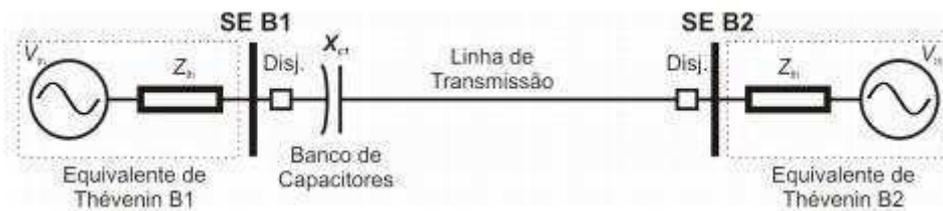
## A.2 – DESCRIÇÃO DO SEP NO QUAL SE ENCONTRA INSTALADA A LT FICT

Figura 25 – Diagrama unifilar da linha de transmissão de 230 kV, LT FICT, entre as subestações SE B1 e SE B2.



Fonte: Próprio autor.

Figura 26– Diagrama unifilar da linha de transmissão de 230 kV, LT FICT (com compensação série em um terminal) entre as subestações SE B1 e SE B2.



Fonte: Próprio autor.

Figura 27– Diagrama unifilar da linha de transmissão de 230 kV, LT FICT (com compensação série em dois terminais) entre as subestações SE B1 e SE B2.



Fonte: Próprio autor.

Os dados da linha de transmissão LT FICT e dos equivalentes de Thévenin são apresentados nas Tabelas 6 e 7, respectivamente, sendo L o comprimento total da LT em quilômetros. Nas Tabelas 8 e 9 são apresentados, respectivamente, os valores de GC e reatância dos bancos de capacitores série em 1 e 2 terminais.

Tabela 6 – Dados da linha de transmissão LT FICT.

<b>Linha de Transmissão</b>	<b><math>R_1(\Omega/\text{km})</math></b>	<b><math>X_1(\Omega/\text{km})</math></b>	<b><math>Y_1(\mu\text{mho}/\text{km})</math></b>	<b><math>X_0(\Omega/\text{km})</math></b>	<b><math>Y_0(\mu\text{mho}/\text{km})</math></b>	<b>L(km)</b>
LT FICT	0,098	0,510	3,252	0,532	2,293	400

Fonte: Próprio autor.

Tabela 7 – Dados dos equivalentes de Thévenin da SE B1 e da SE B2.

<b>Subestação</b>	<b>Impedância <math>Z_{th}</math></b>				<b>Fonte <math>V_{th}</math></b>	<b>Fase(°) (Referência de tensão na fase A)</b>
	<b><math>R_1(\Omega)</math></b>	<b><math>X_1(\Omega)</math></b>	<b><math>R_0(\Omega)</math></b>	<b><math>X_0(\Omega)</math></b>		
B <sub>1</sub>	0,871	25,661	1,014	18,754	1,02	0°
B <sub>2</sub>	0,968	28,513	1,127	20,838	0,98	20°

Fonte: Próprio autor.

Tabela 8 – Reatância dos bancos de capacitores série em um terminal.

<b>GC</b>	<b>Reatância capacitiva instalada <math>X_{c1}(\Omega)</math></b>
0,1%	0,204
10%	20,40
30%	61,20
50%	102,00
70%	142,80

Fonte: Próprio autor.

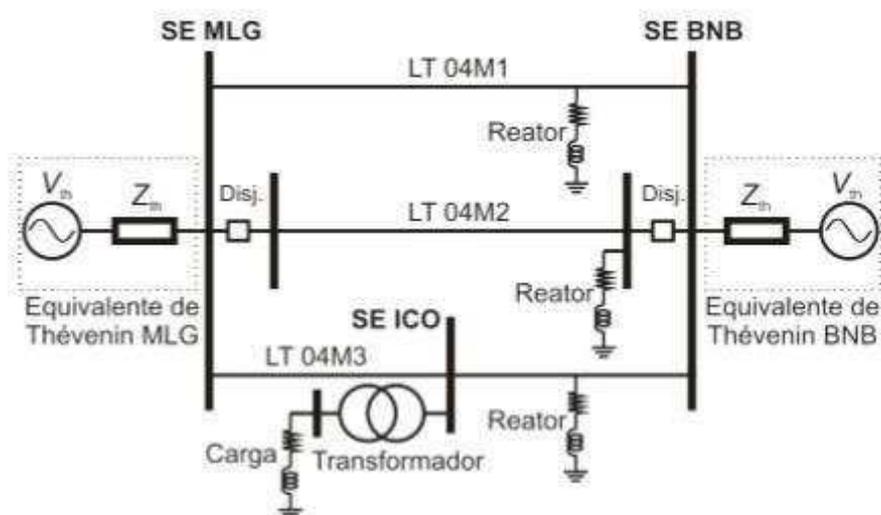
Tabela 9 – Reatância dos bancos de capacitores série em dois terminais.

GC	Reatância capacitiva instalada	
	Xc1 ( $\Omega$ )	Xc2 ( $\Omega$ )
0,1%	0,102	0,102
10%	10,20	10,20
30%	30,60	30,60
50%	51,00	51,00
70%	71,40	71,40

Fonte: Próprio autor.

### A.3 – DESCRIÇÃO DO SEP NO QUAL SE ENCONTRA INSTALADA A LT MLG-BNB

Figura 28 – Diagrama unifilar de parte do SIN referente ao SEP no qual se encontra instalada a linha de 230 kV, LT 04M2, entre as subestações Milagres (SE MLG) e Banabuiú (SE BNB).



Fonte: CARVALHO Jr. (2008).

Tabela 10 – Dados dos equivalentes de Thévenin da SE MLG e da SE BNB.

Subestação	Impedância $Z_{th}$				Fonte $V_{th}$	Fase(°) (Referência de tensão na fase A)
	$R_1(\Omega)$	$X_1(\Omega)$	$R_0(\Omega)$	$X_0(\Omega)$		
B <sub>1</sub>	1,426	12,485	0,6538	9,2342	1,0237	0°
B <sub>2</sub>	5,3471	31,716	4,5018	34,996	1,0237	-8°

Fonte: CARVALHO Jr. (2008).

Tabela 11 – Dados das linhas de transmissão de 230 kV.

Linha de Transmissão	$r_1$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$l_1$ (mH/km)	$c_1$ (nF/km)	$r_0$ ( $\Omega/\text{km}$ )	$l_0$ (mH/km)	$c_0$ (nF/km)	L (km)
Milagres- Banabuiú (LT 04M1)	0,0975	1,379	8,461	0,4111	3,64	6,153	225,9
Milagres- Banabuiú (LT 04M2)	0,0871	0,9774	12,1935	0,3892	3,2541	6,7562	225,2
Milagres-Icó (LT 04M3)	0,0868	0,943	12,488	0,3716	3,208	6,671	102,0
Icó-Banabuiú (LT 04M3)	0,0868	0,943	12,488	0,3749	3,205	6,679	123,1

Fonte: CARVALHO Jr. (2008).