



Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de
Computação



Algoritmos Diretos para Sincronização de Medições e Localização de Faltas em Linhas de Transmissão com Parâmetros Elétricos Desconhecidos

Roana d'Ávila Souza Monteiro

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Manoel Firmino de Medeiros Junior

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Elétrica.

Número de ordem PPgEEC: D310
Natal, Rio Grande do Norte
Dezembro de 2021

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI

Catálogo de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Monteiro, Roana d'Ávila Souza.

Algoritmos diretos para sincronização de medições e localização de faltas em linhas de transmissão com parâmetros elétricos desconhecidos/ Roana d'Ávila Souza Monteiro - 2021.

79 f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Natal, RN, 2021.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Manoel Firmino de Medeiros Junior.

1. Localização de faltas - Tese. 2. Sincronização de medições - Tese. 3. Proteção, monitoramento e controle de sistemas elétricos - Tese. I. Medeiros Junior, Dr.-Ing. Manoel Firmino de. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621.3

Algoritmos Diretos para Sincronização de Medições e Localização de Faltas em Linhas de Transmissão com Parâmetros Elétricos Desconhecidos

Roana d'Ávila Souza Monteiro

Tese de Doutorado aprovada em 30 de setembro de 2021 pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr.-Ing. Manoel Firmino de Medeiros Junior UFRN
Orientador

Prof. Dr. José Tavares de Oliveira UFRN
Examinador Externo ao Programa

Prof^a. Dr^a. Melinda Cesianara Silva da Cruz UFRSA
Examinador Externo à Instituição

Prof. Dr. Felipe Vigolvino Lopes UFPB
Examinador Externo à Instituição

Prof. Dr. Washington Luiz Araújo Neves UFCG
Examinador Externo à Instituição

*Aos meus pais, Hélio e Sidony, e
aos meus avós, Nancy, Risonette
(in memorian) e Hélio.*

Agradecimentos

A Deus por guiar minha vida.

Ao meu marido, Juliano, por todo apoio, incentivo, amor e companheirismo.

A Niko, meu cachorro, pelo companheirismo, carinho e momentos de descontração.

Aos meus pais, Sidony e Hélio, que são fontes inesgotáveis de amor, paciência, compreensão e confiança, e que estão ao meu lado, me oferecendo todo e qualquer amparo em todos os momentos da minha vida.

À minha irmã, Radharany, por todo amor, apoio, incentivo, e companheirismo, trazendo sempre mais felicidade nos nossos momentos compartilhados. Ao meu cunhado, Mateus, por toda paciência, incentivo e apoio ao longo da minha jornada. À minha sobrinha, Maitê, por todo amor, carinho, alegria e descontrações proporcionadas a mim.

Aos meus avós Nancy, Hélio e Risonette (*in memoriam*), por toda ajuda, incentivo e amor dedicado ao longo da minha vida.

À toda minha família, tios e primos, pelo apoio, incentivo e companheirismo.

Aos meus cunhados, João Marcelo e Dayane, e ao meu sobrinho, Bhaskar, por todo apoio, incentivo e companheirismo.

Aos meus amigos Agerlane, Mário, Mariama, João, Marina e Fábio, pelas conversas, apoio, e pelos momentos de descontração, renovando minhas energias.

À minha amiga Adrieny pelo companheirismo, conversas, incentivo e momentos de descontrações.

À minha amiga de infância Mayara por todas conversas, apoio e incentivo.

A todos os amigos que fazem parte da minha vida.

Ao professor Firmino por todos ensinamentos passados, pela orientação, amizade e paciência.

À minha amiga Melinda pelo companheirismo e amizade, pelos ensinamentos, e colaboração neste trabalho.

Ao amigo e professor Felipe Lopes, pela amizade, pelos ensinamentos e contribuições neste trabalho.

Ao professor Tavares por todos ensinamentos e contribuição neste trabalho.

Aos meus amigos e companheiros de trabalho Melinda, Firmino, Thales, Arthur, Juliana e Ednardo por toda ajuda, companheirismo e pausas para o café.

Ao órgão CAPES pelo apoio financeiro.

Resumo

Nesse trabalho são propostas novas metodologias para sincronização de registros oscilográficos e para localização de faltas, ambas baseadas na teoria de fasores fundamentais, de modo independente dos parâmetros elétricos da linha de transmissão e de processos iterativos. No algoritmo de sincronização de medições proposto, o efeito capacitivo da linha é levado em consideração e apenas a análise dos fasores de tensão e corrente em regime permanente é necessária, eliminando a necessidade de ajustes baseados nos parâmetros elétricos da linha. Além disso, identifica ângulos de sincronização em qualquer quadrante, e é insensível às condições de operação do sistema. Condições reais de operação do sistema brasileiro são consideradas para avaliar o desempenho do algoritmo em diferentes cenários, incluindo casos de linhas com carregamento leve, moderado e pesado; e diferentes fatores de potência e comprimentos de linha. Os resultados obtidos mostram que a solução de sincronização proposta é confiável, direta e precisa, sendo útil para aplicações práticas baseadas em fasores de dois terminais quando as fontes tradicionais de referência de tempo comum não estão disponíveis. A ferramenta desenvolvida para localização de faltas necessita de fasores de corrente e tensão pré e pós-falta, funcionando com precisão para todos os tipos de faltas (simétricas e assimétricas), bem como para linhas de transmissão transpostas e não transpostas. A avaliação do algoritmo de localização de falta é realizada por meio de simulações de faltas no software *Alternative Transients Program* (ATP). Os resultados obtidos comprovam a eficiência do método em encontrar o local da falta.

Palavras-chave: Localização de faltas, sincronização de medições, proteção, monitoramento, e controle de sistemas elétricos.

Abstract

In this work, angle synchronization and fault location methods are proposed, based on the fundamental frequency phasor approach, being independent of the electrical parameters of the transmission line and of iterative processes. In the proposed synchronization algorithm, the line capacitive effect is taken into account and only the analysis of steady-state voltage and current phasors is required, eliminating the need for settings based on line electrical parameters. In addition, it identifies angles in any quadrant and is insensitive to system operation conditions. Real operating scenarios of the Brazilian system are considered to assess the algorithm performance, including light, moderate and heavy line loading cases, and various power factors and line lengths. The obtained results show that the proposed synchronization solution is reliable, straightforward, and accurate, being useful for practical two-terminal phasor-based applications when traditional common time reference sources are not available. The tool developed for fault location requires pre and post-fault current and voltage phasors, being suitable for all types of faults (symmetrical and asymmetrical), and for transposed and untransposed transmission lines. The evaluation of the fault location algorithms is performed through fault simulations by the Alternative Transients Program (ATP) software. The obtained results prove the efficiency of the method in finding fault location with good precision.

Keywords: Fault location, synchronization of measurements, protection, monitoring, and control of electrical systems.

Sumário

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	v
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Contribuições da Tese	4
1.2.1 Produção Intelectual	4
1.3 Organização do Texto	4
Lista de Símbolos e Abreviaturas	1
2 Trabalhos relacionados	7
2.1 Algoritmos que Utilizam Medições Sincronizadas	10
2.1.1 Métodos de Localização de Faltas Dependentes dos Parâmetros Elétricos da Linha	10
2.1.2 Métodos de Localização de Faltas Independentes dos Parâmetros Elétricos da Linha	11
2.2 Algoritmos que Utilizam Medições Não-Sincronizadas	11
2.2.1 Métodos de Localização de Faltas Dependentes dos Parâmetros Elétricos da Linha	12
2.2.2 Métodos de Localização de Faltas Independentes dos Parâmetros Elétricos da Linha	12
2.3 Comentários Gerais	13
3 Fundamentação Teórica	15
3.1 Sincronização de Dados	15
3.1.1 Tecnologia de Medição Sincronizada	15
3.2 Transformada Discreta de Fourier	17

3.3	Localização de Faltas	18
3.4	Modelos de Linhas de Transmissão	19
3.4.1	Modelo a Parâmetros Concentrados	20
3.4.2	Modelo a Parâmetros Distribuídos	21
4	Métodos Propostos	23
4.1	Método Proposto para Sincronização de Dados	23
4.1.1	Equacionamento	23
4.1.2	Funcionamento do Algoritmo de Sincronização de Dados	28
4.1.3	Comentários Gerais	28
4.2	Método Proposto para Localização de Faltas	29
4.2.1	Equacionamento	30
4.2.2	Funcionamento do Algoritmo de Localização de Faltas	35
5	Avaliação de Desempenho	37
5.1	Avaliação do Método de Sincronização	37
5.1.1	Avaliação do Método Proposto Usando Dados do ANAREDE	37
5.1.2	Avaliação do Método Proposto Usando Dados da Equação Bi- quadrada	39
5.2	Avaliação da Metodologia de Localização de Faltas	49
6	Conclusão	55
	Referências bibliográficas	57

Lista de Figuras

3.1	Modelo de LT a parâmetros concentrados – linhas curtas ($l < 80 \text{ km}$).	20
3.2	Modelo de LT a parâmetros concentrados – linhas médias ($80 < l < 250 \text{ km}$).	21
3.3	Modelo de LT a parâmetros distribuídos – linhas longas ($l > 250 \text{ km}$).	21
3.4	Modelo de LT a parâmetros distribuídos para a i -ésima componente simétrica.	22
4.1	Circuito equivalente de sequência positiva de uma LT em regime permanente.	24
4.2	Representação Geométrica para a relação entre P_x e P_y .	25
4.3	Fluxograma do algoritmo de sincronização de medições proposto.	27
4.4	Circuito equivalente da LT antes da falta.	30
4.5	Modelo da linha de transmissão durante a falta.	31
4.6	Diagrama de blocos do funcionamento do algoritmo de localização de faltas.	36
5.1	Circuito equivalente da linha de transmissão.	40
5.2	Synchronization absolute error calculated via the proposed algorithm for 138 kV line considering: (a) line loading variation; (b) power factor variation; (c) line length variation.	45
5.3	Synchronization absolute error calculated via the proposed algorithm for 230 kV line considering: (a) line loading variation; (b) power factor variation; (c) line length variation.	46
5.4	Synchronization absolute error calculated via the proposed algorithm for 500 kV line considering: (a) line loading variation; (b) power factor variation; (c) line length variation.	47

Lista de Tabelas

2.1	Resumo da revisão bibliográfica referente a localização de faltas em LT.	14
5.1	Carregamentos da Linha de Transmissão de 138 kV.	38
5.2	Carregamentos da Linha de Transmissão de 230 kV.	38
5.3	Carregamentos da Linha de Transmissão de 500 kV.	38
5.4	Erro Absoluto de Sincronização para Dados do ANAREDE	39
5.5	Parâmetros da rede de transmissão de 138 kV/60 Hz.	42
5.6	Parâmetros da rede de transmissão de 230 kV/60 Hz.	42
5.7	Parâmetros da rede de transmissão de 500 kV/60 Hz.	42
5.8	Dados de erros de sincronização extraídos dos <i>boxplots</i> unificados . .	49
5.9	Parâmetros da rede de transmissão de 400 kV, 50 Hz.	50
5.10	Características das faltas simuladas.	50
5.11	Distância de falta estimada para faltas fase-terra.	51
5.12	Distância de falta estimada para faltas fase-fase.	52
5.13	Distância de falta estimada para faltas fase-fase-terra.	53
5.14	Distância de falta estimada pelo algoritmo proposto para faltas trifásicas.	53

Capítulo 1

Introdução

Os sistemas de energia elétrica possuem como principal função o fornecimento de energia elétrica aos consumidores, em quantidade e qualidade adequadas, no instante em que for solicitada. As linhas de transmissão (LTs) destacam-se como uma das partes mais importantes do sistema, pois possibilitam o transporte de energia elétrica dos centros de geração aos centros de consumo.

A operação segura e confiável do sistema de energia elétrica tornou-se uma tarefa desafiadora devido à crescente demanda por energia elétrica. Este cenário resultou em um número crescente de interconexões de linhas, aumentando a complexidade da rede elétrica (Kyriakides & Heydt 2010). Além disso, no Sistema Interligado Nacional (SIN) há uma predominância de geração de energia elétrica através de usinas hidrelétricas, e, estando os centros de geração, de modo geral, distantes dos grandes centros consumidores, existe a necessidade de linhas longas, as quais devido às suas grandes extensões são mais susceptíveis a ocorrências de distúrbios devido a causas naturais, destacando-se as faltas como o mais preocupante para o SEP (Sistema Elétrico de Potência).

Para que a continuidade da transmissão de energia elétrica seja garantida pela maior parte do tempo, a localização de faltas em LTs deve ser realizada o mais rápido possível. Com o passar dos anos, a busca por meios de minimizar a duração de desligamentos decorrentes de faltas nos SEP tem motivado o desenvolvimento de diversos métodos de localização de faltas, os quais têm sido cada vez mais utilizados por empresas atuantes na transmissão e distribuição de energia elétrica.

Geralmente, após uma primeira estimativa do local de falta calculada por dispositivos localizadores instalados no sistema elétrico, as concessionárias utilizam vias terrestres e/ou helicópteros para identificar o ponto exato da falta, procedimento este que pode ser lento em alguns casos, a depender do comprimento da LT, do relevo da região na qual a LT se encontra instalada, das condições climáticas no mo-

mento da inspeção e da precisão dos dispositivos localizadores. Portanto, é nítida a dificuldade em localizar faltas em LTs quando não se dispõe de uma estimativa inicial confiável do local de falta (Lopes 2014).

Os serviços de transmissão de energia elétrica devem atender a limites mínimos de qualidade energia elétrica, relacionados à continuidade e disponibilidade do serviço, segundo o Operador Nacional de Sistemas Elétricos (ONS) e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Na ocorrência de uma falta ou de um desligamento programado, as concessionárias de energia elétrica devem respeitar os limites padrões de indisponibilidade estabelecidos pelos órgãos regulamentadores, ou sofrerão penalidades em forma de multas ou de compensações financeiras aos consumidores afetados, o que seria muito oneroso. Devido a isso, tem se tornado prática comum nas concessionárias o uso de dispositivos para localização de faltas.

Podem ser encontradas na literatura diversas técnicas que utilizam diferentes análises e conceitos para localizar o ponto de falta em LTs, cada uma com suas potencialidades e limitações. Estas restrições podem estar presentes nas imprecisões que o próprio modelo do localizador pode inserir no processo de indicação de faltas, além de fatores como parâmetros da LT, que não são constantes, já que são afetados diretamente por variações climáticas e pelas solicitações de carga pelo sistema (Liao & Kang 2009). A má sincronização de registros oscilográficos também é outro fator que pode influenciar negativamente na exatidão de algoritmos localizadores (Cruz et al. 2012). Devido a este fato, a maioria dos pesquisadores admite, em seus trabalhos dados previamente sincronizados.

Nesse contexto, algoritmos de monitoramento de linha de dois terminais, como métodos de proteção e localização de faltas, têm sido considerados mais confiáveis do que abordagens de um único terminal. No entanto, como as medições de dois terminais são realizadas em subestações distantes umas das outras, soluções de sincronização de dados são necessárias para garantir o alinhamento adequado entre as referências de tempo de medições locais e remotas.

Diversas soluções de sincronização de dados são usadas em aplicações reais, por exemplo, *Precise Time Protocol* (PTP), *Real-Time Clock* (RTC) (Han et al. 2016), (Ahmed et al. 2018), *Network Time Protocol* (NTP), *Inter-Range Instrumentation Group* (IRIG-B) e *Global Positioning System* (GPS) (Pardo-Zamora et al. 2021). No entanto, supondo que condições adversas possam ocorrer, como fiação de hardware inadequada, problemas de comunicação ou perda de sinal do equipamento de sincronização (por exemplo, GPS), podem ocorrer referências de tempo locais e remotas desalinhadas (Lopes et al. 2021), afetando a maioria das aplicações multi-terminais

de proteção, controle e localização de faltas.

Embora a utilidade de se sincronizar as medições dos terminais de uma linha favoreça diversas aplicações, incluindo diagnóstico de perturbação, proteção e localização de faltas, neste trabalho, enfatizam-se aplicações na área de localização de faltas.

Visando contribuir com a literatura no âmbito de monitoramento de linhas de dois terminais propõe-se neste trabalho uma metodologia analítica de localização de faltas, baseada em fasores e independente dos parâmetros elétricos da linha. O método para estimar a localização de faltas não necessita da sincronização prévia dos dados, visto que neste trabalho também foi desenvolvida uma técnica de sincronização de dados de dois terminais. O algoritmo de sincronização também é baseado em fasores e calcula um ângulo de sincronização entre os terminais da linha tomando como referência um determinado terminal local. É independente dos parâmetros da linha e, como uma solução matemática analítica é desenvolvida, não requer procedimentos iterativos, fornecendo sempre uma resposta factível. Além disso, depende apenas dos fasores de tensão e corrente obtidos durante a operação normal do sistema, de forma que distorções de sinal induzidas por distúrbios não são um problema. O algoritmo identifica o ângulo de sincronização em qualquer quadrante trigonométrico, não requer altas taxas de amostragem e considera o efeito capacitivo da linha, sendo adequado para linhas curtas e longas de alta tensão.

1.1 Objetivos

Esta tese tem como objetivo solucionar problemas de aplicações de dois terminais quando ocorre desalinhamento entre as referências dos terminais local e remoto, assim como encontrar o local de falta em uma LT. Ambas técnicas propostas são baseadas na teoria de fasores fundamentais, e consideram a capacitância *shunt* da linha no equacionamento, parâmetro este negligenciado em outras formulações encontradas na literatura, embora as técnicas aqui apresentadas sejam independentes de todos os parâmetros elétricos da linha.

Portanto, os objetivos específicos são:

- Desenvolver um método direto para identificação do ângulo de sincronização de dados, baseado na teoria de fasores fundamentais, que leve em consideração em sua formulação a capacitância *shunt* da linha, e seja independente dos parâmetros elétricos da linha e das características transitórias do fenômeno

sob análise.

- Desenvolver um método direto para localização de faltas, igualmente, baseado na teoria de fasores fundamentais, que seja independente dos parâmetros elétricos da linha.

1.2 Contribuições da Tese

O principal objetivo desta tese é complementar a literatura existente, contemplando um algoritmo de localização de faltas que não exige a sincronização prévia dos dados, seja independente dos parâmetros elétricos, e de procedimentos iterativos, aplicável a todos os tipos de falta, e ainda, que considera em sua formulação o modelo completo (π -equivalente) da LT.

1.2.1 Produção Intelectual

As publicações abaixo estão relacionadas ao trabalho envolvido:

- MONTEIRO, R. D. S.; CRUZ, M. C. S. ; MEDEIROS, J. O.; MEDEIROS, M.F.; OLIVEIRA, J. T. Um Novo Algoritmo para Sincronização de Registros Oscilográficos em Linhas de Transmissão com Parâmetros Elétricos Desconhecidos. *XXII Congresso Brasileiro de Automática*, João Pessoa, Brasil, setembro 2018.
- MONTEIRO, R. D. S.; CRUZ, M. C. S. ; LOPES, F. V.; MEDEIROS, J. O.; MEDEIROS, M.F. Parameters-Free Non-Iterative Two-Terminal Measurements Synchronization Algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* (Em processo de publicação)

1.3 Organização do Texto

Esta tese está organizada de acordo com a seguinte estrutura:

- No capítulo 2, apresenta-se uma revisão bibliográfica de publicações relevantes no âmbito de sincronização de dados e localização de faltas.
- No capítulo 3, apresenta-se a fundamentação do tema a ser desenvolvido, onde estão abordados alguns dos principais conceitos sobre sincronização de dados,

transformada discreta de Fourier, localização de faltas e modelos de linhas de transmissão.

- No capítulo 4 descrevem-se os desenvolvimentos e funcionamentos dos métodos propostos de sincronização de dados e de localização de faltas.
- No capítulo 5 realiza-se a avaliação de desempenho dos algoritmos de sincronização de dados, bem como do algoritmo de localização de faltas.
- E finalmente, no capítulo 6 apresenta-se as conclusões da tese.

Capítulo 2

Trabalhos relacionados

Sincronizar medições de dois terminais é fundamental para várias aplicações de monitoramento de linha, como proteção de dois terminais, e algoritmos de localização de faltas. Por exemplo, esquemas clássicos de proteção diferencial geralmente requerem dados locais e remotos sincronizados para fornecerem uma proteção unitária adequada da linha. Além disso, em diversos métodos de localização de faltas de dois terminais, a sincronização local e remota dos dados é obrigatória, caso contrário, a localização da falta pode se tornar inviável (Saha et al. 2010), requerendo outras formulações.

Dependendo de como as medições digitais são adquiridas nas extremidades da LT monitorada, algoritmos baseados em dados obtidos de mais de um terminal de linha podem ser separados em duas categorias principais: 1) Algoritmos que usam medições previamente sincronizadas (Johns & Jamali 1990, Girgis et al. 1992, Lawrence et al. 1992, Kezunovic & Perunicic 1996a, Jiang et al. 2000, Yu et al. 2002, Brahma & Girgis 2004); e 2) Algoritmos que funcionam usando medições não sincronizadas. Em relação a este último grupo, ele pode ser dividido em outros dois subgrupos, denominados: 2.1) técnicas que superam a necessidade de sincronização de dados por meio da análise de informações fasoriais não afetadas por desalinhamentos de tempo, como soluções baseadas apenas no módulo das grandezas elétricas; ou 2.2) métodos que calculam fatores de sincronização que compensam desalinhamentos entre medições fasoriais locais e remotas (Girgis et al. 1992, Izykowski et al. 2006, Liao & Elangovan 2006, Liao 2008, Liao & Kang 2009, Izykowski et al. 2010, Apostolopoulos & Korres 2010).

Em relação aos métodos de sincronização de dados baseados em fasores disponíveis na literatura, algumas limitações podem ser verificadas. Dentre as quais as mais críticas, destacam-se a necessidade de configurações baseadas nos parâmetros elétricos da LT (Johns & Jamali 1990, Girgis et al. 1992, Brahma & Girgis 2004, Izykowski

et al. 2006), e a susceptibilidade a não fornecer uma resposta, no caso de um processo iterativo não convergir, como em (Izykowski et al. 2006, Girgis et al. 1992, Liao & Elangovan 2006, Liao 2008, Liao & Kang 2009, Apostolopoulos & Korres 2010, Davoudi et al. 2015).

Também é importante ressaltar que a maioria dos métodos de sincronização existentes estimam o ângulo de sincronização usando como entradas os fasores de tensão e corrente capturados durante o período da falta. Embora esses métodos tenham sido aplicados com sucesso na maioria dos casos, sabe-se que os transitórios do transformador de potencial capacitivo (TPC) durante as condições de falta do sistema podem afetar as funções baseadas em fasores, como métodos de proteção e localização de falta, conforme relatado em (Elmore 2003, Pajuelo et al. 2010, Saha et al. 2010, Reis et al. 2019). Da mesma forma, a saturação do transformador de corrente (TC) também afeta essas funções, conforme abordado em (Elmore 2003, Saha et al. 2010, Herlender et al. 2020). Portanto, na ocorrência de transitórios imprevisíveis de TPC ou TC, os métodos de sincronização baseados no período de falta também podem apresentar erros relevantes, que podem ser críticos se as LTs monitoradas forem equipadas com proteção e disjuntores de alta velocidade. Dessa forma, em situações práticas, depender das grandezas do período de falta pode ser uma desvantagem.

Ao sincronizar os fasores de dois terminais a partir das medições imediatamente antes do início da falta, as deficiências acima mencionadas podem ser superadas, de modo que, o uso de dados pré-falta para fins de sincronização temporal dos dados é preferível. De fato, sincronizando dados por meio da análise de medições pré-falta, o alinhamento dos dados na mesma base de tempo pode ser aplicado diretamente tanto em aplicações em tempo real como off-line, desde que pelo menos uma medição fasorial pré-falta de tensões e correntes esteja disponível.

Mesmo que o procedimento de sincronização seja realizado visando à aplicação de metodologias para diagnóstico de faltas, como métodos de localização de faltas, as abordagens de detecção de distúrbios podem ser aplicadas para separar os períodos de pré-falta e falta, sendo as amostras obtidas imediatamente antes da detecção em ambos os terminais da linha utilizadas para sincronizar referências de tempo local e remoto.

Outra limitação verificada nos métodos de sincronização de medições de dois terminais existentes diz respeito às taxas de amostragem necessárias. Por exemplo, na literatura, um método promissor de sincronização de dados de dois terminais baseado em ondas viajantes é relatado em (Lopes et al. 2018), mas requer altas taxas

de amostragem, o que pode limitar sua aplicação prática se apenas dispositivos baseado em fasores com taxas de amostragem tradicional estiverem disponíveis. Nesse sentido, o desenvolvimento de soluções de sincronização baseadas em fasores ainda é de grande utilidade para a indústria.

Especificamente na literatura sobre aplicações de localização de faltas, muitos autores assumem que os fasores analisados são previamente sincronizados (Girgis et al. 1992, Lawrence et al. 1992, Kezunovic & Perunicic 1996b, Jiang et al. 2000, Brahma & Girgis 2004). Essa suposição nem sempre é verdade. Portanto, considerando possíveis desalinhamentos entre as referências de tempo nos terminais locais e remotos da linha, procedimentos para verificar a condição de sincronização dos dados por meio de uma metodologia extra ou mesmo para sincronizar as diferentes referências de tempo são de grande interesse para as concessionárias de transmissão de energia.

Diferentes métodos para localização de faltas têm sido propostos com o objetivo de encontrar a distância de falta com precisão. Grandes esforços foram realizados no passado para desenvolver algoritmos para estimativa de localização de faltas com base em registros de dados. Com base nos dados disponíveis foram propostos algoritmos baseados em dados de um, dois ou multiterminais.

Algoritmos de localização de faltas que se baseiam em dados de um terminal utilizam medições do terminal local, o que elimina a necessidade de se transferir dados de outro terminal da linha. Porém, a precisão desses algoritmos pode ser afetada pela resistência de falta e pela impedância da fonte equivalente do sistema, representada no terminal local, e ainda, dependem de parâmetros elétricos da LT. Além disso, quanto maior for a quantidade de informações disponíveis sobre o sistema, maior será a precisão do localizador de faltas. Dessa forma, algoritmos de dois terminais geralmente apresentam melhor precisão em localizar o ponto de falta do que algoritmos de um terminal.

Na literatura existem diversos algoritmos para localização de faltas, porém muitos necessitam dos parâmetros elétricos da LT, que não são constantes no decorrer do tempo, pois podem ser afetados por variações climáticas e pelas condições de carregamento do sistema. Dessa forma, prejudicam a precisão desses algoritmos.

Também estão presentes na literatura modelagens para localização de faltas independentes dos parâmetros elétricos da linha. No entanto, não foi constatada a existência de técnicas que além de serem independentes dos parâmetros, não utilizem processo iterativo, sejam aplicáveis a todos os tipos de faltas, e ainda, que considerem o modelo completo (pi-equivalente) da LT.

Nesse sentido, será apresentada uma breve revisão bibliográfica de alguns algoritmos de localização de faltas, apontando as potencialidades e limitações de cada um, e justificando as metodologias propostas nesse trabalho.

2.1 Algoritmos que Utilizam Medições Sincronizadas

Abordam-se nesta seção alguns métodos de localização de faltas que utilizam as medições de tensões e correntes previamente sincronizadas. Duas subseções são apresentadas, reportando métodos que dependem ou não dos parâmetros elétricos da linha.

2.1.1 Métodos de Localização de Faltas Dependentes dos Parâmetros Elétricos da Linha

Johns & Jamali (1990) desenvolveram uma técnica de localização de faltas bastante precisa, que utiliza medições de tensão e corrente pós-falta obtidas de ambos os terminais da LT, sendo independente da resistência de falta e da impedância das fontes. Existe variação na precisão do algoritmo de acordo com a configuração da LT, comprimento e tipo de falta. Esse algoritmo é desenvolvido com base no modelo de LT a parâmetros distribuídos, e é aplicável a LTs transpostas e não transpostas. Uma limitação desse método é depender dos parâmetros elétricos da LT e considerar dados previamente sincronizados.

Em 1992, Girgis et al. propuseram metodologias de localização de faltas baseada em dois e três terminais, utilizando medições de corrente e tensão trifásicas para LTs não transpostas. Tanto para a técnica baseada em dados de dois terminais quanto para três terminais foram propostas metodologias analíticas baseadas em dados previamente sincronizados. Esses procedimentos são aplicáveis para todos os tipos de faltas, e foram desenvolvidos com base no modelo de LT curta. Dessa forma, não é considerado o efeito capacitivo das LTs.

Brahma & Girgis (2004) idealizaram um método de localização de faltas que utiliza medições de tensão sincronizadas de dois terminais, e pode ser aplicado para linhas transpostas ou não transpostas. O uso de apenas dados de tensão como variáveis de entrada elimina erros de medições de correntes que poderiam ser inseridos por meio da imprecisão dos transformadores de correntes, os quais podem ser da ordem

de até 10%. A técnica apresentada é dependente dos parâmetros elétricos da linha e não considera a influência da capacitância *shunt* da linha em seu equacionamento.

2.1.2 Métodos de Localização de Falhas Independentes dos Parâmetros Elétricos da Linha

Radojevic et al. (2009) apresentam um algoritmo numérico para localização de falhas assimétricas, independente de parâmetros elétricos da LT. Nessa metodologia não é considerado o efeito capacitivo da linha, já que, segundo os autores, ela foi desenvolvida para uma linha com comprimento menor que 100 km, podendo ser considerada como uma LT curta. Considera-se ainda que os dados de tensão e corrente encontram-se sincronizados pela tecnologia de medição sincronizada (do inglês, *Synchronized Measurement Technology (SMT)*), a qual é um conceito baseado no uso de GPS para sincronizar diferentes dispositivos eletrônicos inteligentes em uma grande rede elétrica.

Davoudi et al. (2015) propuseram um algoritmo de localização de falhas de dois terminais independente de parâmetros elétricos da LT. O método utiliza valores pós-falha de tensão e corrente de ambos terminais da linha, considera o efeito capacitivo da LT, e ainda funciona para todos os tipos de falta. Esta técnica converte a localização de falta em um problema de otimização, solucionado por algoritmo genético. As variáveis de decisão da função objetivo são a distância de falta e os parâmetros da linha. O algoritmo apresenta um ótimo desempenho, porém assume que os dados de entrada devem estar sincronizados, e é avaliado apenas para LT transposta. Além disso, o uso de uma meta heurística não proporciona a segurança de que o ótimo global foi realmente encontrado.

2.2 Algoritmos que Utilizam Medições Não-Sincronizadas

Nesta seção encontram-se alguns métodos de localização de falhas que não necessitam de dados previamente sincronizados, e, da mesma forma que na seção 2.1, estão divididos em duas subseções, os que dependem ou não dos parâmetros elétricos da linha.

2.2.1 Métodos de Localização de Falhas Dependentes dos Parâmetros Elétricos da Linha

No mesmo trabalho já mencionado na subseção 2.1.1, (Girgis et al. 1992), também foram propostos algoritmos de dois e três terminais utilizando medições de corrente e tensão trifásicas para LTs não transpostas. Esses métodos utilizam um processo iterativo para estimar o ângulo de sincronização e a distância de falta. Da mesma forma que para os algoritmos que consideram os dados previamente sincronizados, são aplicáveis para todos os tipos de faltas, e foram desenvolvidos com base no modelo de LT a parâmetros concentrados para linhas curtas. Conseqüentemente, o efeito capacitivo das LTs são desconsiderados.

2.2.2 Métodos de Localização de Falhas Independentes dos Parâmetros Elétricos da Linha

Em 2006, Liao & Elangovan propõem um algoritmo de dois terminais independente de parâmetros elétricos da LT. O método utiliza medições de corrente e tensão de ambos os terminais da linha durante a falta, e não requer sincronização prévia desses dados. Um conjunto de equações complexas envolvendo parâmetros da LT, distância da falta e ângulo de sincronização foi estabelecido, a partir das quais seis equações podem ser obtidas. Dessa forma, as seis variáveis desconhecidas são iterativamente resolvidas por aplicação do método de Newton-Raphson. Esse algoritmo é limitado a faltas assimétricas, e ainda, no seu equacionamento não são considerados os efeitos capacitivos da LT.

Liao (2008) apresenta duas metodologias para localização de faltas utilizando dados não sincronizados de tensão e corrente pós falta. Ambos os métodos são aplicáveis a LT transpostas e dispensam o conhecimento dos parâmetros elétricos da linha. A primeira, uma versão melhorada do algoritmo apresentado em (Liao & Elangovan 2006), propõe uma redução na quantidade de variáveis desconhecidas estimadas pelo método iterativo de Newton-Raphson, porém ainda funciona apenas para faltas assimétricas. A segunda, não utiliza procedimentos iterativos para encontrar a distância de falta, porém não considera a capacitância *shunt* da linha em sua modelagem, além de não ser eficaz para faltas trifásicas.

Liao & Kang (2009) propõem duas metodologias, uma delas estende a metodologia apresentada em (Liao & Elangovan 2006) considerando agora a capacitância *shunt* da linha, e utiliza um processo iterativo para estimar a distância de falta, o

ângulo de sincronização e os parâmetros da linha. Essa primeira técnica é aplicável para todos os tipos de falta e utiliza dados pré e pós falta como variáveis de entrada. A segunda técnica foi desenvolvida para casos em que os dados pré falta não estão disponíveis e funciona apenas para faltas assimétricas. Ambas as técnicas são avaliadas com dados de LTs transpostas.

Em 2010, Apostolopoulos & Korres propõem um algoritmo para localização de faltas em LTs, independente dos parâmetros elétricos da linha, utilizando medições de tensões e correntes não sincronizadas dos dois terminais da LT. O primeiro passo do desenvolvimento desse algoritmo consiste em negligenciar a capacitância *shunt* para, através do método iterativo de Newton, para cálculo da raiz de uma equação, obter uma estimação inicial do ângulo de sincronização, e posteriormente do local de falta. Na segunda etapa, esses valores são usados como valores iniciais no método de Newton-Raphson, agora, considerando no equacionamento a capacitância *shunt* da linha para obter uma estimação para o local de falta e ângulo de sincronização. A desvantagem é a utilização de procedimentos iterativos, que podem não convergir. Dessa forma, esse algoritmo torna-se mais apropriado para aplicações *offline*.

Para aumentar a precisão na estimativa da distância de falta alguns autores (Liao & Elangovan 2006, Liao 2008, Liao & Kang 2009, Apostolopoulos & Korres 2010, Radojevic et al. 2009, Davoudi et al. 2015) desenvolveram algoritmos localizadores de falta independentes dos parâmetros elétricos da LT, excluindo esses parâmetros do equacionamento, ou transformando-os em incógnitas do problema.

2.3 Comentários Gerais

Com base na literatura atual não se constatou a existência de algum método direto para localização de faltas, aplicável a todos os tipos de faltas e LTs (transposta e não transposta), independente dos parâmetros elétricos, e ainda, que considere o efeito capacitivo da linha. A tabela 2.1 apresenta as principais características dos algoritmos desenvolvidos por cada uma das referências expostas neste capítulo, e permite uma melhor visualização das potencialidades e limitações de cada uma delas.

Tabela 2.1: Resumo da revisão bibliográfica referente a localização de faltas em LT.

Referência	NT	IP	C	Tipo		ISincP	Transposição		MD	IndPRE	
				de Falta			da LT				
				ASS	SIM		LT-T	LT-NT			
Johns e Jamali (1990)	2	–	✓	✓	–	–	✓	✓	✓	✓	
Girgis et al (1992)	Alg. 1	2	–	–	✓	✓	–	–	✓	✓	–
	Alg. 2	2	–	–	✓	✓	✓	–	✓	–	–
	Alg. 3	3	–	–	✓	✓	–	–	✓	✓	–
	Alg. 4	3	–	–	✓	✓	✓	–	✓	–	–
Brahma e Girgis (2004)	2	–	–	✓	✓	–	✓	✓	✓	✓	
Liao e Elangovan (2006)	2	✓	–	✓	–	✓	✓	–	–	✓	
Liao (2008)	Alg. 1	2	✓	–	✓	–	✓	✓	–	–	✓
	Alg. 2	2	✓	–	✓	✓	✓	✓	–	✓	✓
Liao e Kang (2009)	Alg. 1	2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	–	–	–
	Alg. 2	2	✓	✓	✓	–	✓	✓	–	–	✓
Radojevic et al. (2009)	2	✓	–	✓	–	–	✓	–	✓	✓	
Apostolopoulo e Korres (2010)	2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	–	–	
Davoudi et al (2015)	2	✓	✓	✓	✓	–	✓	–	–	✓	
Algoritmo de Localização Proposto	2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	–	

Legenda:

NT = Número de terminais monitorados;

IP = Indepe de parâmetros elétricos;

C = Considera efeito capacitivo da LT;

ASS = Assimétrica;

SIM = Simétrica;

ISincP = Indepe de sincronização prévia dos dados;

LT-T = Funciona para LT transposta;

LT-NT = Funciona para LT não transposta;

MD = Método direto (indepde de procedimento iterativo);

IndPRE = Indepe de dados Pré-falta.

Capítulo 3

Fundamentação Teórica

3.1 Sincronização de Dados

Os ângulos de fase dos fasores de tensão dos barramentos da rede de energia sempre foram de especial interesse para os engenheiros de sistemas de energia. É bem conhecido que o fluxo de potência ativa (real) em uma linha é quase proporcional ao seno da diferença angular entre as tensões nos dois terminais da linha. Como muitas das considerações de planejamento e operação em uma rede de energia estão diretamente relacionadas com o fluxo de potência ativa, medir as diferenças de ângulo na transmissão tem sido uma preocupação por muitos anos (Phadke & Thorp 2017).

Os Sistemas de Medição Fasorial Sincronizada (SMFS) constituem uma tecnologia para o aprimoramento da operação dos sistemas elétricos, e são constituídos, basicamente pelas Unidades de Medição Fasorial (PMUs), do inglês *Phasor Measurement Units* (PMUs), localizadas em pontos estratégicos do sistema elétrico, pelos concentradores de dados e pelos canais de comunicação.

3.1.1 Tecnologia de Medição Sincronizada

Tecnologia de medição sincronizada, conhecida em inglês como *Synchronized Measurement Technology* (SMT) é um conceito baseado no uso do Sistema de Posicionamento Global (GPS - *Global Position System*), sincronizando diferentes dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs - *Intelligent Electronic Devices*) em uma ampla rede. Esse conceito inclui os seguintes blocos de construção principais:

- unidades de medição fasorial (PMUs);
- concentradores de dados;
- canais de comunicação, e
- base de dados.

3.1.1.1 Unidades de Medição Fasorial - PMUs

A PMU é o elemento base de um sistema de medição fasorial sincronizado. Essencialmente, a PMU é um dispositivo de medição de tensões e correntes alternadas, com uma referência temporal comum, obtida através de sinais via satélite (GPS). As medidas de tensão e corrente são processadas pela PMU e convertidas em fasores e, então, enviadas ao concentrador de dados (Bhargava 1999).

O GPS é um sistema de posicionamento, navegação e cronometragem baseado no espaço, consistindo de 24 satélites que giram constantemente em torno da Terra. Uma vez que um receptor de GPS fornece sincronização de tempo com uma precisão de $\pm 1 \mu s$, em sistemas de energia, as PMUs usando sincronização via GPS podem ser aplicadas com à localização e análise de faltas, e à proteção de LTs aéreas. O GPS é usado para sincronizar os relógios dos dispositivos de medição que amostram tensões e correntes nos terminais da linha.

3.1.1.2 Concentrador de Dados - PDC

O concentrador de dados, referido como PDC (do inglês, *Phasor Data Concentrator*), tem a finalidade de receber os fasores enviados pelas PMUs; verificar eventuais erros de transmissão; organizar e disponibilizar dados para outras aplicações.

Conforme (Xie et al. 2006), as principais características que um PDC deve ter para garantir um bom desempenho de um sistema de medição fasorial sincronizada são:

- simultaneidade: receber, processar e disponibilizar os dados fasoriais simultaneamente;
- robustez: suportar falhas de hardware e software, armazenar de forma segura os dados fasoriais e, ainda, suportar falhas nos canais de comunicação sem perda de dados;
- expansibilidade: suportar o aumento do processamento de dados, devido ao aumento no número de PMUs;
- rapidez: manter o equilíbrio entre o tempo de acesso e a capacidade de armazenamento.

3.1.1.3 Canais de Comunicação

Os canais de comunicação têm o objetivo bem definido de viabilizar a transferência de dados entre as PMUs e o PDC, bem como permitir a troca de informações

entre PDCs de diferentes áreas. Podem ser utilizados, como sistemas de conexão entre as PMUs e os PDCs, links de fibra óptica, canais de microondas (Yi et al. 2001), Power Line Communication (PLC), sistema de modems e, até mesmo, a própria internet com o sistema de Virtual Private Network -VPN (Liu 2002).

3.1.1.4 Base de Dados

A base de dados é um importante componente, que tem como função principal coletar e arquivar os dados do PDC.

3.2 Transformada Discreta de Fourier

Em sistemas de energia, as formas de onda de tensão e corrente são essencialmente ondas senoidais com frequência fundamental bem definida. Esses sinais são efetivamente periódicos quando o sistema está funcionando em condições de regime permanente. Em condições de falta, a frequência fundamental e a amplitude da tensão e da corrente pode ser extraída dos sinais não periódicos usando a transformada de Fourier. As funções básicas escolhidas para a Transformada de Fourier são as exponenciais complexas $g(t) = e^{-j\omega t}$. Para alguns fabricantes de PMU é uma prática comum empregar a transformada discreta de Fourier aplicada a uma janela de amostras que se move, e cuja largura pode variar de frações de ciclos a um ciclo (Phadke & Thorp 2017).

Considere o processo de seleção, em uma janela de dados, de N amostras $x(k\Delta T)$ com $k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$, em que ΔT é o intervalo de amostragem. Essas amostras podem ser vistas como as obtidas pela multiplicação do sinal $x(t)$, da função de amostragem $\delta(t)$ e da função do janelamento $\omega(t)$ conforme 3.1,

$$y(t) = x(t)\delta(t)\omega(t) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k\Delta T)\delta(t - k\Delta T), \quad (3.1)$$

tomando-se uma sequência periódica discreta $x(k\Delta T)$ com N amostras por período, tem-se (3.2),

$$y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k\Delta T)e^{\frac{-j2\pi nm}{N}}, \quad (3.2)$$

em que $y(t)$ é um número complexo representando o valor da componente harmônica de ordem m e n é o contador de amostras.

3.3 Localização de Falhas

As principais causas de falhas em LTs são: tempestades, raios, neve, quebra de isolamentos e curto-circuito causado por pássaros ou algum agente externo. Na maioria dos casos essas falhas se manifestam em danos mecânicos, que precisam ser reparados antes que a linha possa voltar a operar normalmente. Para um restabelecimento rápido da continuidade da transmissão de energia elétrica o local de falta precisa ser estimado com razoável precisão.

As falhas podem ser permanentes ou temporárias, e os localizadores devem fornecer estimativa do local de falta para as duas situações. Geralmente, as falhas transitórias causam danos menores, que não são facilmente visíveis na inspeção, porém, uma estimativa do local do defeito pode ser útil para manutenções ou reparos, a fim de evitar a recorrência do defeito e consequentemente danos maiores (Saha et al. 2010).

Localização de falta é um processo destinado a localizar a falta ocorrida com a maior precisão possível. Um localizador de falhas é um algoritmo, embarcado ou não em um dispositivo, utilizado para estimar a distância até a falta, quando embarcado, funciona de forma automática, e pode ser implementado em relés de proteção baseados em microprocessadores ou em registradores digitais de falta, do contrário, são implementados em um *software* computacional, localizadores de falhas autônomos ou programas de análise pós falta.

Os algoritmos de localização de falhas podem ser classificados nas categorias seguintes (Saha et al. 2010):

- Métodos baseados em componentes fundamentais;
- Métodos baseados na teoria de ondas viajantes;
- Métodos baseados em componentes de alta frequência;

Os algoritmos desenvolvidos a partir de componentes de frequência fundamental são os mais utilizados pelas concessionárias de energia elétrica, por serem relativamente simples e baratos, requerem baixas taxas de amostragem e, em geral, pouco esforço computacional. Esses algoritmos se baseiam no cálculo de fasores fundamentais do SEP, a partir de algoritmos de estimação de fasores, já que, a princípio, apenas as amostras dos sinais avaliados são conhecidas. Os principais métodos disponíveis na literatura se baseiam na teoria dos mínimos quadrados, filtros de Fourier, Transformada *Wavelet*, e outros fundamentados a partir de modificações dos filtros de Fourier (Lopes 2014).

Os métodos baseados na teoria de ondas viajantes e em componentes de alta frequência são fundamentados na análise de transitórios de falta. O primeiro, é elaborado a partir das *treliças* formadas pelos gráficos que representam a propagação dos transitórios ao longo da LT. Dessa forma, detectando-se os instantes de incidência das ondas viajantes aos terminais monitorados, conhecendo-se o comprimento da linha e sabendo que a velocidade de propagação das ondas é aproximadamente a velocidade da luz, torna-se possível obter expressões matemáticas que permitem relacionar a distância do ponto de falta aos instantes de chegada das ondas viajantes às extremidades da LT (Gale et al., 1993 apud Lopes, 2014). O segundo, identifica as frequências dominantes das ondas viajantes incidentes nos terminais da linha, e não requerem sincronização de dados, por não necessitarem de análises no domínio do tempo (Lopes 2014).

Além disso, pode-se utilizar a inteligência artificial, técnica que apresenta como procedimento fundamental o reconhecimento de padrões nos sinais de tensão e corrente, sejam eles relacionados aos transitórios ou às componentes fundamentais no período de falta. No geral, essas técnicas requerem grandes esforços computacionais para determinação da distância de falta (Saha et al. 2010).

3.4 Modelos de Linhas de Transmissão

A escolha do modelo matemático da LT é fundamental no desenvolvimento do equacionamento do algoritmo de localização de faltas, pois está diretamente relacionado com a precisão do localizador.

A modelagem a parâmetros concentrados representa com boa precisão LTs de comprimentos curtos e médios. Quando uma LT é representada como curta, significa que a capacitância *shunt* é muito pequena e pode ser inteiramente desprezada sem perda apreciável na precisão, portanto é suficiente considerar apenas a resistência e indutância em série para todo o comprimento da linha.

Uma linha média pode ser representada com precisão suficiente por parâmetros R e L concentrados e com metade da capacitância à terra por fase concentrada em cada extremidade. A condutância, g , em derivação é normalmente desprezada no cálculo de linhas aéreas de transmissão de potência, para a maioria das aplicações.

Para LT longas, ou quando se deseja alto grau de precisão, deve-se considerar que os seus parâmetros são distribuídos uniformemente ao longo de todo seu comprimento.

3.4.1 Modelo a Parâmetros Concentrados

No modelo a parâmetros concentrados mais simples para uma linha aérea, somente é considerada a impedância série (Z_{SR}), conforme representado na figura 3.1. Dessa forma, o efeito capacitivo é desprezado (Glover et al. 2011). Esse modelo é adequado para representar LT com comprimentos de até 80 km.

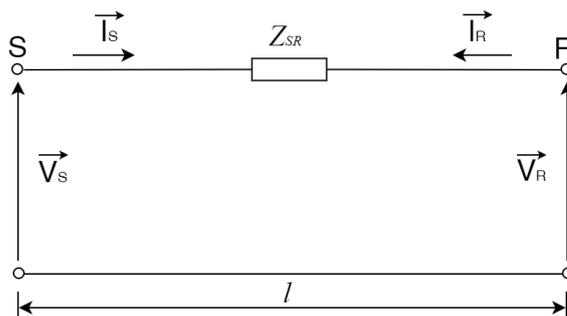


Figura 3.1: Modelo de LT a parâmetros concentrados – linhas curtas ($l < 80 \text{ km}$).

Em que:

- \vec{V}_S, \vec{V}_R – fasores de tensão nos terminais S e R ;
- \vec{I}_S, \vec{I}_R – fasores de corrente nos terminais S e R ;
- $Z_{SR} = (R_L + j\omega L)l$ – impedância série da linha por unidade de comprimento;
- R_L, L – resistência e indutância da linha por unidade de comprimento;
- l – comprimento da LT;
- ω – frequência angular fundamental.

Para LT com comprimento entre 80 e 250 km (linhas médias) é comum incorporar a admitância *shunt* ao modelo da linha. A condutância *shunt* é geralmente desprezada e somente a capacitância *shunt* da linha é considerada nesse modelo, para isso, se insere metade da capacitância *shunt* em cada terminal da LT, conforme representado pela figura 3.2.

Em que:

- $Y_{SR} = (j\omega C)l$ – admitância *shunt* da linha por unidade de comprimento;
- C – capacitância da linha por unidade de comprimento.

Para linhas longas é necessário considerar o modelo a parâmetros distribuídos, pois no modelo a parâmetros concentrados não é considerado o tempo de propagação das ondas, ou seja, variações nos sinais do terminal S da linha são instantaneamente percebidos no terminal R. Entretanto, para LT pequenas esse tempo é muito pequeno, podendo ser desconsiderado.

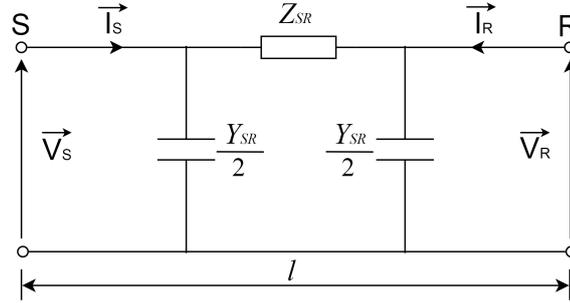


Figura 3.2: Modelo de LT a parâmetros concentrados – linhas médias ($80 < l < 250 \text{ km}$).

3.4.2 Modelo a Parâmetros Distribuídos

Para melhorar a precisão da localização de faltas, principalmente em linhas longas, deve-se considerar que os parâmetros elétricos são uniformemente distribuídos ao longo de todo comprimento da linha, e portanto, o modelo a parâmetros distribuídos deve ser considerado. Nesse tipo de modelagem a tensão e a corrente ao longo da linha são funções da distância x (ponto X) a partir do terminal S, e do tempo, t , conforme circuito equivalente de uma LT longa, ilustrada na figura 3.3. Sendo, Δx : elementos incrementais da LT; Z_{SR} g e c : impedância série, condutância e capacitância em derivação, respectivamente. E ainda, $u(x, t)$ e $i(x, t)$ a tensão e a corrente, as quais estão relacionadas com os parâmetros da linha.

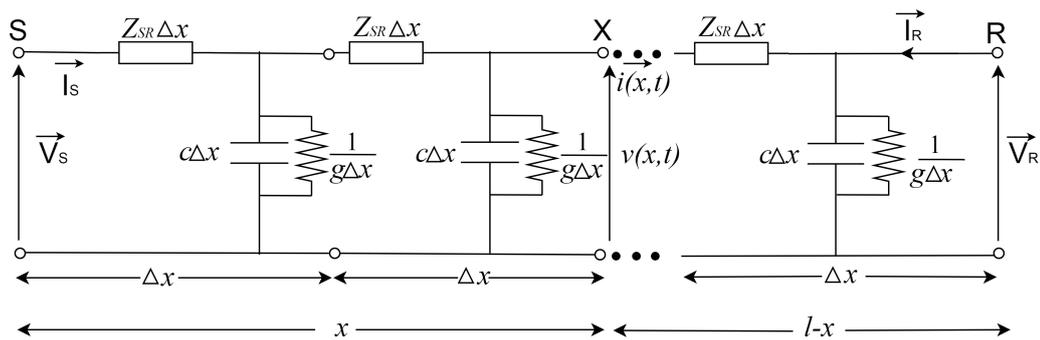


Figura 3.3: Modelo de LT a parâmetros distribuídos – linhas longas ($l > 250 \text{ km}$).

Para componentes de frequência fundamental, o circuito da figura 3.3 pode ser representado pelo circuito ilustrado na figura 3.4, no qual é considerada a i -ésima componente simétrica, em que $i = 1$ representa a sequência positiva, $i = 2$ a sequência negativa e $i = 0$ a sequência zero (Saha et al. 2010), λ_i a constante de propagação

da linha para a i -ésima componente de sequência:

$$\lambda_i = \sqrt{(r_i + j\omega l_i)(g_i + j\omega c_i)}, \quad (3.3)$$

e Z_{ci} a impedância característica da LT para a i -ésima componente de sequência:

$$Z_{ci} = \sqrt{\frac{(r_i + j\omega l_i)}{(g_i + j\omega c_i)}}. \quad (3.4)$$

Em que, r_i , l_i , g_i e c_i são respectivamente a resistência série, indutância série, condutância em derivação e capacitância em derivação por unidade de comprimento, para a i -ésima componente de sequência.

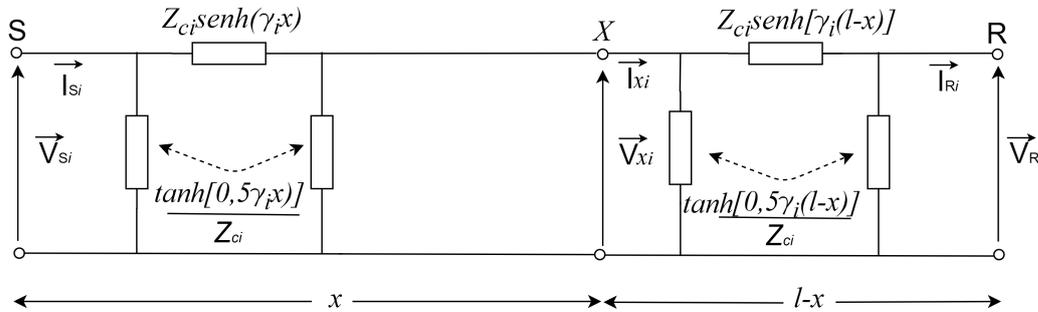


Figura 3.4: Modelo de LT a parâmetros distribuídos para a i -ésima componente simétrica.

Capítulo 4

Métodos Propostos

Os dois métodos propostos nesta tese encontram-se detalhados neste capítulo. O algoritmo de sincronização de medições proposto é equacionado de forma analítica, a partir do circuito equivalente de sequência positiva em regime permanente de uma LT. Considera-se na formulação tanto a impedância série como a capacitância *shunt* da linha, as quais são eliminadas a partir de procedimentos matemáticos. Esse algoritmo é um aprimoramento das técnicas apresentadas em (Cruz et al. 2015) e (Monteiro et al. 2018), tendo em vista que apresentaram falhas para algumas situações de operação do sistema.

O método de localização de faltas proposto também é solucionado de forma analítica a partir de dois circuitos equivalentes de uma LT, antes e durante a falta. Tanto a impedância série como os elementos *shunt* são considerados no equacionamento, porém a partir de alguns procedimentos matemáticos esses elementos são eliminados, tornando o algoritmo de localização de faltas independente de parâmetros elétricos.

O resultado final é um algoritmo direto de localização de faltas independente dos parâmetros elétricos da linha e da sincronização prévia dos dados, visto que o algoritmo de sincronização de dados foi incorporado a ele, e ainda, considera em sua formulação a capacitância *shunt* da linha.

4.1 Método Proposto para Sincronização de Dados

4.1.1 Equacionamento

Nesta seção estão apresentados os fundamentos matemáticos do algoritmo de sincronização de dados, descrito por meio do circuito equivalente de sequência positiva ilustrado na Figura 4.1, na qual, \hat{V}_{S_1} , \hat{I}_{S_1} , \hat{V}_{R_1} , \hat{I}_{R_1} representam os fasores

de tensão e corrente em regime permanente nos terminais S e R, respectivamente. O subscrito 1 nos fasores de tensão e corrente refere-se à componente de sequência positiva. Os símbolos Z_{SR} e Y_{SR} retratam, nesta ordem, os valores complexos da impedância série e da admitância *shunt* de sequência positiva da LT. Adotando o nó S como terminal de referência e analisando a Figura 4.1, uma relação entre os fasores de tensão e corrente pode ser obtida, resultando em:

$$\hat{I}_{S_1} + \hat{I}_{R_1} e^{j\delta} = \frac{Y_{SR}}{2} \left(\hat{V}_{S_1} + \hat{V}_{R_1} e^{j\delta} \right), \quad (4.1)$$

em que δ é o ângulo de sincronização entre os terminais S e R. A equação (4.1)

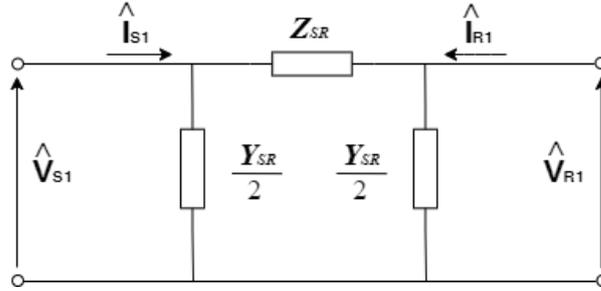


Figura 4.1: Circuito equivalente de sequência positiva de uma LT em regime permanente.

tem natureza complexa, e suas partes reais e imaginárias podem ser analisadas separadamente. Considerando $Y_{SR} = g_{shunt} - jb_{shunt}$, e desprezando a condutância *shunt* a equação (4.1) resulta em duas equações reais, 4.2 e 4.3.

$$I_{S_1} \cos(\theta_{I_{S_1}}) + I_{R_1} \cos(\theta_{I_{R_1}} + \delta) = -\frac{b_{shunt}}{2} (V_{S_1} \sin(\theta_{V_{S_1}}) + V_{R_1} \sin(\theta_{V_{R_1}} + \delta)), \quad (4.2)$$

$$I_{S_1} \sin(\theta_{I_{S_1}}) + I_{R_1} \sin(\theta_{I_{R_1}} + \delta) = \frac{b_{shunt}}{2} (V_{S_1} \cos(\theta_{V_{S_1}}) + V_{R_1} \cos(\theta_{V_{R_1}} + \delta)). \quad (4.3)$$

$V_{S_1}, I_{S_1}, V_{R_1}, I_{R_1}$, representam os módulos de tensão e corrente de sequência positiva, em regime permanente, nos terminais S e R, nesta ordem; e $\theta_{V_{S_1}}, \theta_{I_{S_1}}, \theta_{V_{R_1}}, \theta_{I_{R_1}}$,

suas respectivas fases. Relacionando (4.2) e (4.3) resulta em:

$$\frac{I_{S_1} \cos(\theta_{I_{S_1}}) + I_{R_1} \cos(\theta_{I_{R_1}} + \delta)}{I_{S_1} \sin(\theta_{I_{S_1}}) + I_{R_1} \sin(\theta_{I_{R_1}} + \delta)} = \frac{\frac{-b_{shunt}}{2} (V_{S_1} \sin(\theta_{V_{S_1}}) + V_{R_1} \sin(\theta_{V_{R_1}} + \delta))}{\frac{b_{shunt}}{2} (V_{S_1} \cos(\theta_{V_{S_1}}) + V_{R_1} \cos(\theta_{V_{R_1}} + \delta))}, \quad (4.4)$$

que pode ser reorganizado da seguinte forma:

$$P = P_x \cos(\delta) + P_y \sin(\delta), \quad (4.5)$$

em que:

$$P = V_{S_1} I_{S_1} \cos(\theta_{V_{S_1}} - \theta_{I_{S_1}}) + V_{R_1} I_{R_1} \cos(\theta_{V_{R_1}} - \theta_{I_{R_1}}), \quad (4.6)$$

$$P_x = -V_{R_1} I_{S_1} \cos(\theta_{I_{S_1}} - \theta_{V_{R_1}}) - V_{S_1} I_{R_1} \cos(\theta_{V_{S_1}} - \theta_{I_{R_1}}), \quad (4.7)$$

$$P_y = V_{R_1} I_{S_1} \sin(\theta_{V_{R_1}} - \theta_{I_{S_1}}) + V_{S_1} I_{R_1} \sin(\theta_{I_{R_1}} - \theta_{V_{S_1}}). \quad (4.8)$$

A equação (4.5) é uma função de apenas uma variável desconhecida, denominada δ . As duas parcelas do segundo membro estão relacionadas a componentes ortogonais (funções cosseno e seno) e, portanto, a equação (4.5) pode ser analisada por meio de uma inspeção triangular, conforme se ilustra na Figura 4.2. Tal análise resulta na seguinte relação:

$$\frac{P}{\sqrt{(P_x^2 + P_y^2)}} = \sin(\beta) \cos(\delta) + \sin(\delta) \cos(\beta). \quad (4.9)$$

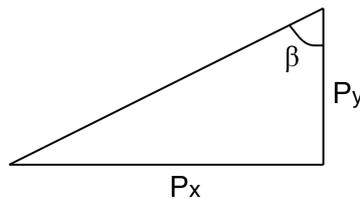


Figura 4.2: Representação Geométrica para a relação entre P_x e P_y .

A equação (4.9) pode ser simplificada, resultando em:

$$\frac{P}{\sqrt{(P_x^2 + P_y^2)}} = \text{sen}(\beta + \delta) = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \beta - \delta\right). \quad (4.10)$$

Analisando a equação (4.10) e a Figura 4.2, δ pode ser calculado como:

$$\delta = \frac{\pi}{2} - \beta - \phi, \quad (4.11)$$

Em que:

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{|P_y|}{\sqrt{(P_x^2 + P_y^2)}}\right),$$

$$\phi = \cos^{-1}\left(\frac{P}{\sqrt{(P_x^2 + P_y^2)}}\right).$$

Na equação (4.11), considera-se que $\phi \geq 0^\circ$. No entanto, uma vez que o cosseno é uma função par, os mesmos resultados seriam obtidos para $\phi < 0^\circ$, do seguinte modo:

$$\delta = \frac{\pi}{2} - \beta - (-\phi). \quad (4.12)$$

Nas equações (4.11) e (4.12), é necessário identificar em qual quadrante o ângulo de sincronização, δ , se encontra. Este procedimento é crucial para garantir a sincronização correta das medições nos dois terminais, caso contrário, δ pode apresentar erros relevantes. Assim, todas as combinações possíveis dos valores P_x e P_y são analisadas, garantindo uma estimativa adequada para δ , independentemente do quadrante o qual o ângulo se encontra. Em resumo, dois valores possíveis de δ são estimados para cada combinação P_x e P_y , denotados como δ_1 e δ_2 . Dentre essas estimativas, foi possível observar que a opção correta deve fornecer uma admitância *shunt* positiva, e a menor diferença angular entre as tensões elétricas em ambos os terminais da LT, já que normalmente, a outra opção viola o limite de estabilidade estática.

O algoritmo proposto pode ser descrito a partir do fluxograma ilustrado na Figura 4.3, e detalhado na subseção 4.1.2. Nas equações (4.13) e (4.14), V_{R,δ_1} , V_{R,δ_2} , I_{R,δ_1} , I_{R,δ_2} , representam os fasores de tensão e corrente no terminal receptor corrigidos por δ_1 e δ_2 . Esses fasores de tensão e corrente corrigidos são utilizados para calcular

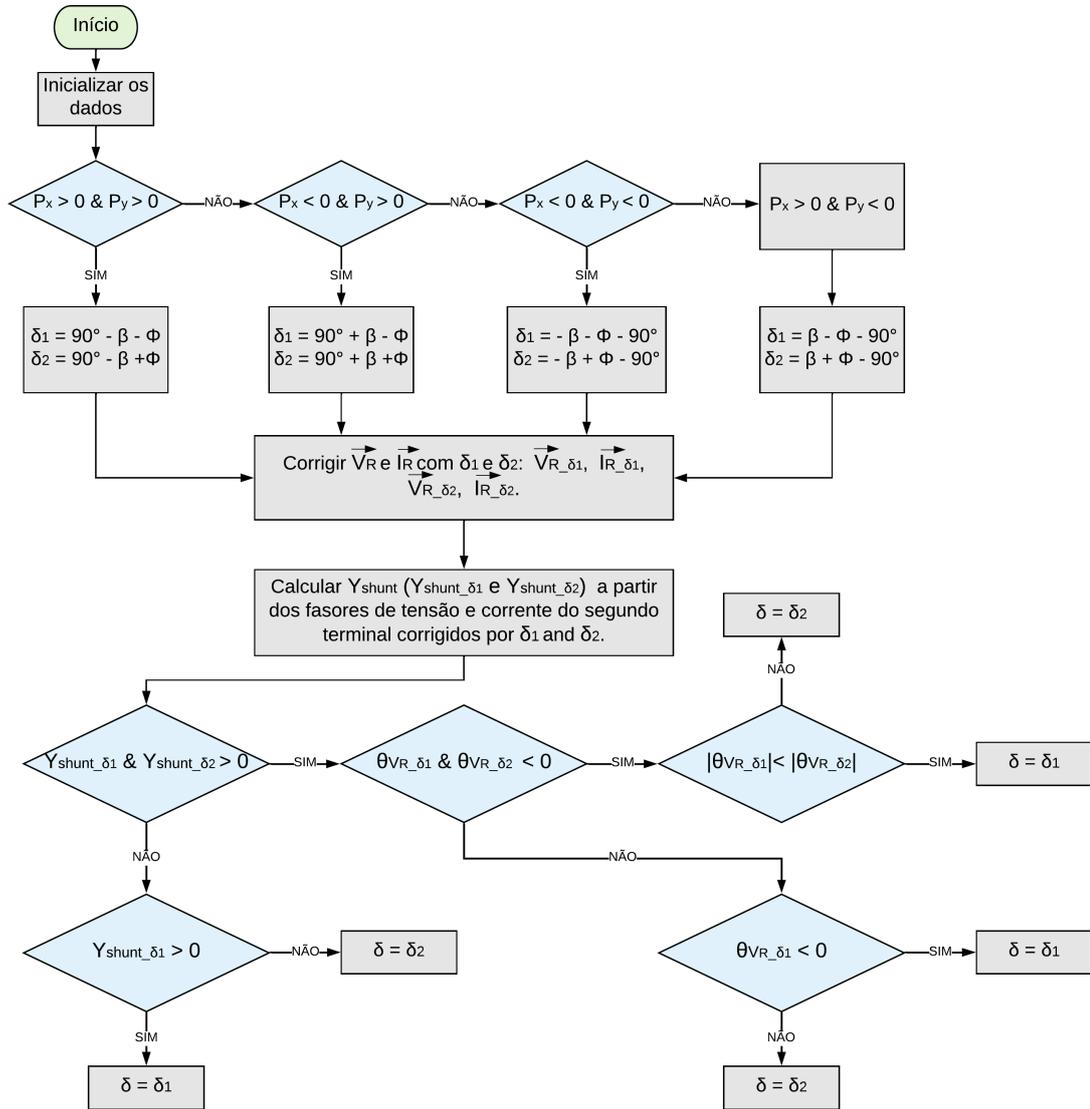


Figura 4.3: Fluxograma do algoritmo de sincronização de medições proposto

$Y_{shunt_{\delta_1}}$ e $Y_{shunt_{\delta_2}}$ usando as seguintes fórmulas:

$$Y_{shunt_{\delta_1}} = 2 \left(\frac{\hat{I}_{S_1} + \hat{I}_{R_{\delta_1}}}{\hat{V}_{S_1} + \hat{V}_{R_{\delta_1}}} \right), \quad (4.13)$$

$$Y_{shunt_{\delta_2}} = 2 \left(\frac{\hat{I}_{S_1} + \hat{I}_{R_{\delta_2}}}{\hat{V}_{S_1} + \hat{V}_{R_{\delta_2}}} \right), \quad (4.14)$$

4.1.2 Funcionamento do Algoritmo de Sincronização de Dados

A partir do fluxograma descrito na Figura 4.3 a inicialização do algoritmo de sincronização de dados ocorre com o carregamento dos dados e posterior análise do sinal de P_x e P_y . Essas variáveis dependem, unicamente, dos fasores de tensões e correntes nos terminais S e R, em regime permanente. Após a identificação dos sinais de P_x e P_y o algoritmo calcula dois possíveis valores para o ângulo de sincronização, δ_1 e δ_2 . Para definir qual deles é o correto foram utilizados dois artifícios, observados a partir da análise dos dados para diversas situações. O primeiro artifício utilizado é baseado na informação que a admitância *shunt* calculada a partir dos fasores de tensões e correntes corrigidos por δ_1 e δ_2 deve ser positiva. E o segundo, analisa a diferença angular entre as tensões elétricas nos terminais da linha.

Primeiramente a tensão e a corrente no segundo terminal foram corrigidas por δ_1 e δ_2 , e nomeadas por V_{R,δ_1} , V_{R,δ_2} , I_{R,δ_1} , I_{R,δ_2} . Posteriormente foram calculados os valores da admitância *shunt* corrigidos por δ_1 e δ_2 , denominados por Y_{shunt,δ_1} e Y_{shunt,δ_2} , respectivamente.

Na sequência, o algoritmo segue com a análise do sinal de Y_{shunt,δ_1} e Y_{shunt,δ_2} . Caso apenas uma das admitâncias seja positiva o ângulo de sincronização correto pode ser identificado, e corresponde àquele que resulta na admitância maior que zero. Caso ambos os valores encontrados para as admitâncias sejam positivos é necessário verificar se a diferença angular entre as tensões elétricas nos terminais da linha, considerando a tensão no final da linha corrigida por δ_1 e δ_2 , é negativa. Caso isso ocorra em ambas as situações deve-se adotar como valor de ângulo correto o que resulta na menor diferença angular entre as tensões elétricas nos terminais da linha, já que o outro valor viola o limite de estabilidade estática. Caso apenas uma das situações resulte em uma diferença angular negativa, o ângulo correto será o correspondente.

Neste trabalho, a fase da tensão elétrica no terminal S foi considerada como referência, zero graus. Portanto, no fluxograma deve-se entender que $\theta_{V_{R,\delta_1}}$ representa na verdade $\theta_{V_S} - \theta_{V_{R,\delta_1}}$ e $\theta_{V_{R,\delta_2}} = \theta_{V_S} - \theta_{V_{R,\delta_2}}$.

4.1.3 Comentários Gerais

Como se pode observar, a solução proposta é bastante simples de ser implementada, sendo livre de procedimentos iterativos. De fato, o algoritmo combina

simplicidade com robustez ao efeito capacitivo e às incertezas nos parâmetros da linha, sendo muito atraente para aplicações reais.

Além disso, no contexto de soluções de sincronização temporal, como o GPS, é importante enfatizar que os erros de alinhamento de tempo podem variar ao longo do tempo. Portanto, esses erros podem apresentar variações relevantes se forem considerados longos períodos de mau funcionamento do GPS. Considerando este aspecto, caso aplicações de relé de sistema de potência e localização de faltas sejam de interesse, o algoritmo de sincronização proposto é recomendado para ser aplicado tomando amostras imediatamente antes do instante de início da falta. Isso pode ser realizado utilizando detectores de perturbação, que estão prontamente disponíveis em relés de proteção e cujas informações de saída são frequentemente acessíveis em registros de falta.

Como resultado, o tempo de início da perturbação pode ser identificado, servindo como uma primeira referência ao algoritmo proposto, que deve ser aplicado tomando amostras de fasores antes do tempo de início da perturbação identificado. Com isso, evita-se sincronizar fasores de períodos muito diferentes, de forma que um ângulo de sincronização preciso δ possa ser obtido para aquele evento específico, superando problemas relacionados a erros de GPS variantes no tempo e, assim, permitindo a aplicação confiável de funcionalidades de proteção e localização de faltas.

O desempenho da solução proposta foi demonstrado testando-se: a) dados de LT reais brasileiras, a partir do *software* ANAREDE, o qual permitiu extrair os dados necessários a partir da execução do fluxo de carga, conforme se apresenta na seção 5.1.1; b) dados de uma equação biquadrática do algoritmo de fluxo de carga soma de potências, que permite a análise de diversos cenários de carregamento do sistema elétrico, conforme apresentado na seção 5.1.2.

4.2 Método Proposto para Localização de Faltas

Apresenta-se nesta seção o desenvolvimento do algoritmo de localização de faltas, que é uma adaptação do algoritmo apresentado em (Apostolopoulos & Korres 2010). O algoritmo proposto também independe dos parâmetros elétricos da LT, e ainda, possui a vantagem de não conter procedimentos iterativos, dessa forma, fornecendo sempre uma resposta para a distância de falta. Para faltas assimétricas, as variáveis de entrada envolvem fasores trifásicos dos dois terminais, já para faltas simétricas são necessários apenas os fasores de uma das fases. Para o procedimento de sincronização de fasores é utilizado o algoritmo apresentado na seção 4.1, também independente

dos parâmetros elétricos da LT, e de processos iterativos.

4.2.1 Equacionamento

Na figura 4.4 é apresentado o circuito equivalente de dois terminais, SR, da LT.

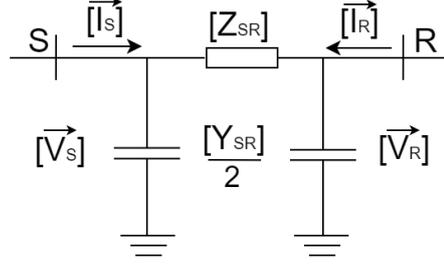


Figura 4.4: Circuito equivalente da LT antes da falta.

As variáveis que contém as setas sobrescritas indicam fasores, logo, $[\vec{V}_S]$, $[\vec{V}_R]$, $[\vec{I}_S]$, $[\vec{I}_R]$, representam vetores de fasores trifásicos de tensão e corrente pré-falta nos terminais S e R. Assim, $[\vec{V}_S] = [\vec{V}_{S_a} \ \vec{V}_{S_b} \ \vec{V}_{S_c}]^T$; $[\vec{V}_R] = [\vec{V}_{R_a} \ \vec{V}_{R_b} \ \vec{V}_{R_c}]^T$; $[\vec{I}_S] = [\vec{I}_{S_a} \ \vec{I}_{S_b} \ \vec{I}_{S_c}]^T$; $[\vec{I}_R] = [\vec{I}_{R_a} \ \vec{I}_{R_b} \ \vec{I}_{R_c}]^T$; e, $[Z_{SR}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{bmatrix}$: representa a matriz simétrica de impedância série da LT SR (transposta ou não transposta); $[Y_{SR}] = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ab} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ac} & Y_{bc} & Y_{cc} \end{bmatrix}$: a matriz simétrica de admitância *shunt* da LT SR (transposta ou não transposta); T: o operador de transposição vetorial.

Da figura 4.4 é possível obter as seguintes equações:

$$[\vec{V}_S] - [\vec{V}_R]e^{j\delta} = [Z_{SR}] \left(\frac{[Y_{SR}]}{2} [\vec{V}_R]e^{j\delta} - [\vec{I}_R]e^{j\delta} \right); \quad (4.15)$$

$$[\vec{V}_R]e^{j\delta} - [\vec{V}_S] = [Z_{SR}] \left(\frac{[Y_{SR}]}{2} [\vec{V}_S] - [\vec{I}_S] \right). \quad (4.16)$$

Nessas equações, δ é o ângulo de sincronização entre as medições nos terminais S e R.

Somando e subtraindo, respectivamente, as equações (4.15) e (4.16), obtemos as seguintes equações:

$$[\vec{I}_S] + [\vec{I}_R]e^{j\delta} = \frac{[Y_{SR}]}{2} \left([\vec{V}_S] + [\vec{V}_R]e^{j\delta} \right); \quad (4.17)$$

$$2 \left([\vec{V}_S] - [\vec{V}_R]e^{j\delta} \right) = [Z_{SR}] \left(\left([\vec{I}_S] - [\vec{I}_R]e^{j\delta} \right) - \frac{[Y_{SR}]}{2} \left([\vec{V}_S] - [\vec{V}_R]e^{j\delta} \right) \right). \quad (4.18)$$

Na figura 4.5 está representado o modelo da LT durante a falta. Nessa figura, a letra F indica o ponto de falta, d a distância desconhecida da falta a partir do terminal S, em por unidade (pu). Os parâmetros $R_{F_a}, R_{F_b}, R_{F_c}, R_g$: são as resistências desconhecidas de falta e de terra, respectivamente, durante a falta. $[\vec{V}_{SF}]$, $[\vec{V}_{RF}]$, $[\vec{I}_{SF}]$, $[\vec{I}_{RF}]$, representam vetores de fasores trifásicos de tensão e corrente pós-falta, respectivamente, nos terminais S e R. Logo, $[\vec{V}_{SF}] = [\vec{V}_{SF_a} \ \vec{V}_{SF_b} \ \vec{V}_{SF_c}]^T$, $[\vec{V}_{RF}] = [\vec{V}_{RF_a} \ \vec{V}_{RF_b} \ \vec{V}_{RF_c}]^T$, $[\vec{I}_{SF}] = [\vec{I}_{SF_a} \ \vec{I}_{SF_b} \ \vec{I}_{SF_c}]^T$, $[\vec{I}_{RF}] = [\vec{I}_{RF_a} \ \vec{I}_{RF_b} \ \vec{I}_{RF_c}]^T$.

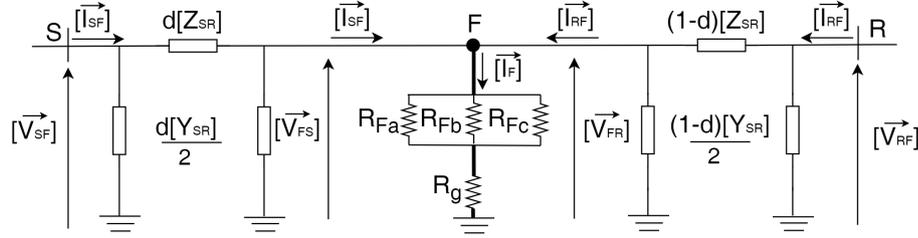


Figura 4.5: Modelo da linha de transmissão durante a falta.

A partir da figura 4.5 podem ser obtidas as seguintes equações:

$$[\vec{V}_F] = [\vec{V}_{SF}] + [Z_{SR}] \left(d^2 \frac{[Y_{SR}]}{2} [\vec{V}_{SF}] - d [\vec{I}_{SF}] \right); \quad (4.19)$$

$$[\vec{V}_F] = [\vec{V}_{RF}]e^{j\delta} + [Z_{SR}] \left((1-d)^2 \frac{[Y_{SR}]}{2} [\vec{V}_{RF}] - (1-d) [\vec{I}_{RF}] \right) e^{j\delta}. \quad (4.20)$$

Em que, $[\vec{V}_F]$ representa o vetor de fasores trifásicos de tensão no ponto da falta, então, $[\vec{V}_F] = [\vec{V}_{F_a} \ \vec{V}_{F_b} \ \vec{V}_{F_c}]^T$.

A partir das equações (4.19) e (4.20), temos:

$$\begin{aligned} & [\vec{V}_{SF}] - [\vec{V}_{RF}]e^{j\delta} = \\ & [Z_{SR}] \left(\frac{[Y_{SR}]}{2} \left((1-d)^2 [\vec{V}_{RF}]e^{j\delta} - d^2 [\vec{V}_{SF}] \right) + d \left([\vec{I}_{SF}] + [\vec{I}_{RF}]e^{j\delta} \right) - [\vec{I}_{RF}]e^{j\delta} \right) \end{aligned} \quad (4.21)$$

Pegando o transposto da equação (4.21) e multiplicando-se ambos os lados pela expressão $[\vec{I}_S] - [\vec{I}_R]e^{j\delta} - \frac{[Y_{SR}]}{2} \left([\vec{V}_S] - [\vec{V}_R]e^{j\delta} \right)$, obtém-se:

$$\begin{aligned}
& \left([\vec{V}_{SF}]^T - [\vec{V}_{RF}]^T e^{j\delta} \right) \left(([\vec{I}_S] - [\vec{I}_R] e^{j\delta}) - \frac{[Y_{SR}]}{2} ([\vec{V}_S] - [\vec{V}_R] e^{j\delta}) \right) = \\
& \left(((1-d)^2 [\vec{V}_{RF}]^T e^{j\delta} - d^2 [\vec{V}_{SF}]^T) \frac{[Y_{SR}]}{2} + d \left([\vec{I}_{SF}]^T + [\vec{I}_{RF}]^T e^{j\delta} \right) - [\vec{I}_{RF}]^T e^{j\delta} \right) \\
& \cdot [Z_{SR}] \left(([\vec{I}_S] - [\vec{I}_R] e^{j\delta}) - \frac{[Y_{SR}]}{2} ([\vec{V}_S] - [\vec{V}_R] e^{j\delta}) \right).
\end{aligned} \tag{4.22}$$

Substituindo a equação (4.18) na equação (4.22), obtém-se a equação (4.23), independente de $[Z_{SR}]$.

$$\begin{aligned}
& \left([\vec{V}_{SF}]^T - [\vec{V}_{RF}]^T e^{j\delta} \right) \left([\vec{I}_S] - [\vec{I}_R] e^{j\delta} \right) - 2 \left(d \left([\vec{I}_{SF}]^T + [\vec{I}_{RF}]^T e^{j\delta} \right) - [\vec{I}_{RF}]^T e^{j\delta} \right) \\
& \cdot \left([\vec{V}_S] - [\vec{V}_R] e^{j\delta} \right) = \left(2 \left((1-d)^2 [\vec{V}_{RF}]^T e^{j\delta} - d^2 [\vec{V}_{SF}]^T \right) \right. \\
& \left. + \left([\vec{V}_{SF}]^T - [\vec{V}_{RF}]^T e^{j\delta} \right) \cdot ([Y_{SR}]/2) \right) \left([\vec{V}_S] - [\vec{V}_R] e^{j\delta} \right)
\end{aligned} \tag{4.23}$$

Em (Apostolopoulos & Korres 2010) o algoritmo é dividido em dois estágios. No primeiro, os parâmetros *shunt* não são considerados, o que resulta em uma equação complexa da distância de falta em função do ângulo de sincronização. Considerando que a distância é um número real, a parte imaginária dessa equação é igualada a zero, e o método de Newton é aplicado para encontrar o valor inicial do ângulo de sincronização, e logo em seguida esse valor é substituído para encontrar a distância de falta. A precisão desses resultados é comprometida, já que a capacitância *shunt* da linha é negligenciada.

Na segunda etapa, os valores encontrados no estágio anterior são utilizados como valores iniciais para os cálculos do ângulo de sincronização e da distância de falta, nesta ocasião, considerando os parâmetros *shunt* da linha. Tanto neste trabalho como na segunda etapa do algoritmo proposto em (Apostolopoulos & Korres 2010) as capacitâncias mútuas entre fases da LT são desprezadas, única maneira de se eliminar os parâmetros elétricos da linha, e a matriz admitância *shunt* pode ser reescrita como:

$$\frac{[Y_{SR}]}{2} = [Y] = \begin{bmatrix} Y_a & 0 & 0 \\ 0 & Y_b & 0 \\ 0 & 0 & Y_c \end{bmatrix}. \tag{4.24}$$

Nessa equação, tem-se que:

$$Y_a = \frac{\vec{I}_{S_a} + \vec{I}_{R_a} e^{j\delta}}{\vec{V}_{S_a} + \vec{V}_{R_a} e^{j\delta}}; \quad (4.25)$$

$$Y_b = \frac{\vec{I}_{S_b} + \vec{I}_{R_b} e^{j\delta}}{\vec{V}_{S_b} + \vec{V}_{R_b} e^{j\delta}}; \quad (4.26)$$

$$Y_c = \frac{\vec{I}_{S_c} + \vec{I}_{R_c} e^{j\delta}}{\vec{V}_{S_c} + \vec{V}_{R_c} e^{j\delta}}. \quad (4.27)$$

As equações (4.25), (4.26) e (4.27) foram obtidas adicionando (4.15) a (4.16), e isolando a matriz de admitância. Dessa forma, o algoritmo torna-se independente dos parâmetros da LT.

Diferentemente do que foi proposto em (Apostolopoulos & Korres 2010), neste trabalho, a distância de falta é calculada de forma analítica, garantindo sempre o fornecimento de uma resposta para a distância de falta, já que não depende da convergência de um procedimento iterativo. A equação (4.23) é utilizada como base para determinar as equações da distância de falta para faltas assimétricas e simétricas do algoritmo de localização de faltas proposto neste trabalho, apresentadas em 4.2.1.1 e 4.2.1.2, respectivamente.

4.2.1.1 Faltas Assimétricas

Como mencionado anteriormente, para faltas assimétricas o algoritmo é dependente dos fasores trifásicos das tensões e correntes dos dois terminais da LT.

Isolando d e d^2 na equação (4.23) obtém-se (4.28), uma equação do segundo grau em d .

$$\begin{aligned} f(d) = & d^2 \left(2[\vec{V}_{SF}]^T [Y][\vec{V}_S] - 2[\vec{V}_{RF}]^T [Y][\vec{V}_S] e^{j\delta} - 2[\vec{V}_{SF}]^T [Y][\vec{V}_R] e^{j\delta} + 2[\vec{V}_{RF}]^T [Y][\vec{V}_R] e^{j2\delta} \right) \\ & + d \left(-2[\vec{I}_{SF}]^T [\vec{V}_S] - 2[\vec{I}_{RF}]^T [\vec{V}_S] e^{j\delta} + 2[\vec{I}_{SF}]^T [\vec{V}_R] e^{j\delta} + 4[\vec{V}_{RF}]^T [Y][\vec{V}_S] e^{j\delta} \right. \\ & \quad \left. - 4[\vec{V}_{RF}]^T [Y][\vec{V}_R] e^{j2\delta} + 2[\vec{I}_{RF}]^T [\vec{V}_R] e^{j2\delta} \right) + [\vec{V}_{SF}]^T [\vec{I}_S] - [\vec{V}_{SF}]^T [Y][\vec{V}_S] \\ & + e^{j\delta} \left(-[\vec{V}_{RF}]^T [\vec{I}_S] - [\vec{V}_{SF}]^T [\vec{I}_R] + 2[\vec{I}_{RF}]^T [\vec{V}_S] - [\vec{V}_{RF}]^T [Y][\vec{V}_S] + [\vec{V}_{SF}]^T [Y][\vec{V}_R] \right) \\ & + e^{j2\delta} \left([\vec{V}_{RF}]^T [\vec{I}_R] + [\vec{V}_{RF}]^T [Y][\vec{V}_R] - 2[\vec{I}_{RF}]^T [\vec{V}_R] \right) = 0 \end{aligned} \quad (4.28)$$

De forma simplificada, tem-se:

$$f(d) = Pd^2 + Qd + R = 0. \quad (4.29)$$

Em que:

$$P = 2[\vec{V}_{SF}]^T[Y][\vec{V}_S] - 2[\vec{V}_{RF}]^T[Y][\vec{V}_S]e^{j\delta} - 2[\vec{V}_{SF}]^T[Y][\vec{V}_R]e^{j\delta} + 2[\vec{V}_{RF}]^T[Y][\vec{V}_R]e^{j2\delta};$$

$$Q = -2[\vec{I}_{SF}]^T[\vec{V}_S] - 2[\vec{I}_{RF}]^T[\vec{V}_S]e^{j\delta} + 2[\vec{I}_{SF}]^T[\vec{V}_R]e^{j\delta} + 4[\vec{V}_{RF}]^T[Y][\vec{V}_S]e^{j\delta} \\ - 4[\vec{V}_{RF}]^T[Y][\vec{V}_R]e^{j2\delta} + 2[\vec{I}_{RF}]^T[\vec{V}_R]e^{j2\delta};$$

$$R = [\vec{V}_{SF}]^T[\vec{I}_S] - [\vec{V}_{SF}]^T[Y][\vec{V}_S] + e^{j\delta} \left(-[\vec{V}_{RF}]^T[\vec{I}_S] - [\vec{V}_{SF}]^T[\vec{I}_R] + 2[\vec{I}_{RF}]^T[\vec{V}_S] \right. \\ \left. - [\vec{V}_{RF}]^T[Y][\vec{V}_S] + [\vec{V}_{SF}]^T[Y][\vec{V}_R] \right) + e^{j2\delta} \left([\vec{V}_{RF}]^T[\vec{I}_R] + [\vec{V}_{RF}]^T[Y][\vec{V}_R] - 2[\vec{I}_{RF}]^T[\vec{V}_R] \right).$$

A equação (4.29), é de natureza complexa, e portanto, pode ser separada em duas equações reais, que resultam em quatro possíveis valores para a distância da falta. Dois desses valores podem ser rejeitados por serem irrealistas, menores que zero ou maiores do que o comprimento da linha, os outros dois são analisados para obter a solução para a distância de falta.

4.2.1.2 Faltas Simétricas

Como para faltas simétricas o algoritmo depende dos fasores de tensões e correntes apenas em uma das fases de ambos terminais da LT, fase a nesse caso, a equação 4.28 pode ser escrita conforme (4.30).

$$f(d) = d^2 \left(2\vec{V}_{SF_a} Y_a \vec{V}_{S_a} - 2\vec{V}_{RF_a} Y_a \vec{V}_{S_a} e^{j\delta} - 2\vec{V}_{SF_a} Y_a \vec{V}_{R_a} e^{j\delta} + 2\vec{V}_{RF_a} Y_a \vec{V}_{R_a} e^{j2\delta} \right) \\ + d \left(-2\vec{I}_{SF_a} \vec{V}_{S_a} - 2[\vec{I}_{RF_a}] \vec{V}_{S_a} e^{j\delta} + 2\vec{I}_{SF_a} \vec{V}_{R_a} e^{j\delta} + 4\vec{V}_{RF_a} Y_a \vec{V}_{S_a} e^{j\delta} - 4\vec{V}_{RF_a} Y_a \vec{V}_{R_a} e^{j2\delta} \right. \\ \left. + 2\vec{I}_{RF_a} \vec{V}_{R_a} e^{j2\delta} \right) + \vec{V}_{SF_a} \vec{I}_{S_a} - \vec{V}_{SF_a} Y_a \vec{V}_{S_a} + e^{j\delta} \left(-\vec{V}_{RF_a} \vec{I}_{S_a} - \vec{V}_{SF_a} \vec{I}_{R_a} + 2\vec{I}_{RF_a} \vec{V}_{S_a} \right. \\ \left. - \vec{V}_{RF_a} Y_a \vec{V}_{S_a} + \vec{V}_{SF_a} Y \vec{V}_{R_a} \right) + e^{j2\delta} \left(\vec{V}_{RF_a} \vec{I}_{R_a} + \vec{V}_{RF_a} Y_a \vec{V}_{R_a} - 2\vec{I}_{RF_a} \vec{V}_{R_a} \right) = 0 \quad (4.30)$$

De uma maneira simplificada, tem-se:

$$f(d) = P_a d^2 + Q_a d + R_a = 0. \quad (4.31)$$

Em que:

$$P_a = 2\vec{V}_{SF_a} Y_a \vec{V}_{S_a} - 2\vec{V}_{RF_a} Y_a \vec{V}_{S_a} e^{j\delta} - 2\vec{V}_{SF_a} Y_a \vec{V}_{R_a} e^{j\delta} + 2\vec{V}_{RF_a} Y \vec{V}_{R_a} e^{j2\delta}, \quad (4.32)$$

$$Q_a = -2\vec{I}_{SF_a}\vec{V}_{S_a} - 2\vec{I}_{RF_a}\vec{V}_{S_a}e^{j\delta} + 2\vec{I}_{SF_a}\vec{V}_{R_a}e^{j\delta} + 4\vec{V}_{RF_a}Y_a\vec{V}_{S_a}e^{j\delta} - 4\vec{V}_{RF_a}Y_a\vec{V}_{R_a}e^{j2\delta} + 2\vec{I}_{RF_a}\vec{V}_{R_a}e^{j2\delta}, \quad (4.33)$$

$$R_a = \vec{V}_{SF_a}\vec{I}_{S_a} - \vec{V}_{SF_a}Y_a\vec{V}_{S_a} + e^{j\delta}\left(-\vec{V}_{RF_a}\vec{I}_{S_a} - \vec{V}_{SF_a}\vec{I}_{R_a} + 2\vec{I}_{RF_a}\vec{V}_{S_a} - \vec{V}_{RF_a}Y_a\vec{V}_{S_a} + \vec{V}_{SF_a}Y_a\vec{V}_{R_a}\right) + e^{j2\delta}\left(\vec{V}_{RF_a}\vec{I}_{R_a} + \vec{V}_{RF_a}Y_a\vec{V}_{R_a} - 2\vec{I}_{RF_a}\vec{V}_{R_a}\right). \quad (4.34)$$

Da mesma forma que para faltas assimétricas, a equação (4.31) é de natureza complexa, e portanto, pode ser separada em duas equações reais, que resultam em quatro possíveis valores para a distância da falta. Dois desses valores podem ser rejeitados por serem irrealistas, menores que zero ou maiores do que o comprimento da linha, os outros dois são analisados para obter a solução para a distância de falta.

4.2.2 Funcionamento do Algoritmo de Localização de Faltas

Para um melhor entendimento do funcionamento do algoritmo de localização de faltas pode-se observar o diagrama de blocos apresentado na figura 4.6. Primeiramente são carregados os dados amostrados de tensão e corrente em dois terminais da LT, obtidos de registros oscilográficos ou de simulações. Em seguida obtêm-se os fasores de tensão e corrente pré-falta, a partir da Transformada Discreta de Fourier (TDF) de um ciclo. Para extrair os fasores pós-falta é necessário primeiramente identificar a amostra de início de falta, e aplicar a TDF de um ciclo, cinco ciclos após a primeira amostra de falta.

De posse dos fasores de tensão e corrente pré-falta encontra-se o erro em ângulo entre as medições nos dois terminais da linha, aplicando-se o algoritmo de sincronização apresentado na seção 4.1. Dessa forma é possível sincronizar os fasores de tensão e corrente antes e durante a falta. Para correta localização da falta é necessário identificar se a falta é assimétrica ou simétrica, já que, no primeiro caso, são utilizados os fasores trifásicos de tensão e corrente, enquanto no segundo caso, são utilizados apenas os fasores da fase a . Essas equações fornecem dois valores de distância falta factíveis, geralmente bem próximos um do outro. Nos resultados apresentados neste trabalho é exibida a melhor opção.

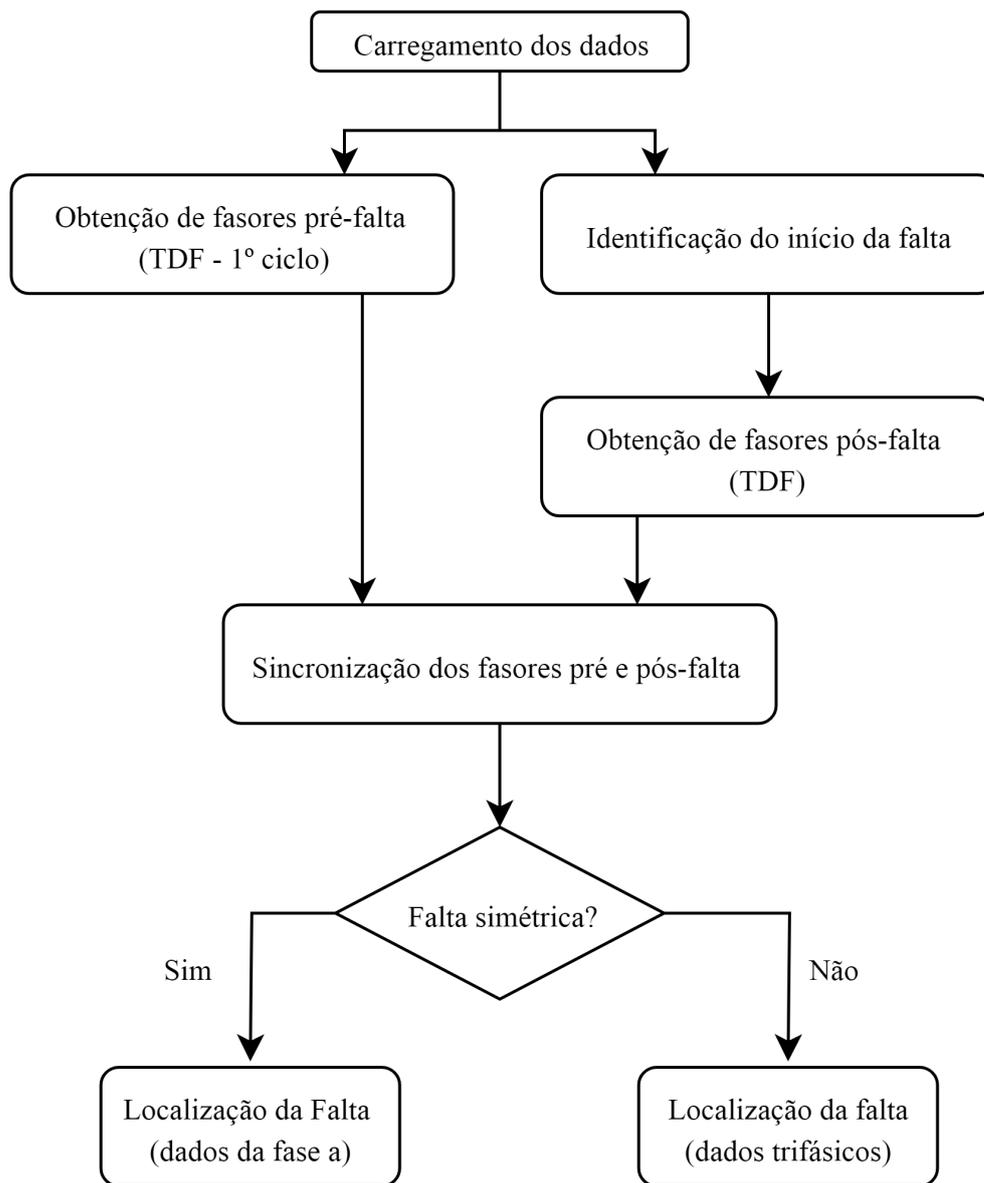


Figura 4.6: Diagrama de blocos do funcionamento do algoritmo de localização de faltas.

Capítulo 5

Avaliação de Desempenho

Neste capítulo são apresentados os desempenhos dos métodos propostos para estimação do ângulo de sincronização, bem como para a localização da falta em uma LT.

5.1 Avaliação do Método Proposto para Sincronização de Medições

O desempenho da solução proposta para sincronização de medições foi demonstrado testando-se: a) dados de LT reais brasileiras, a partir do *software* ANAREDE; b) dados de uma equação biquadrada do algoritmo de fluxo de carga pelo método da soma de potências, que permite a análise de diversos cenários de carregamento do sistema elétrico.

5.1.1 Avaliação do Método Proposto Usando Dados do ANAREDE

Para avaliar o desempenho da metodologia de sincronização de medição de dois terminais proposta, uma das formas de testar o algoritmo foi utilizar dados da rede elétrica brasileira de 138 kV, 230 kV e 500 kV, considerando três níveis de carregamento da linha: leve, moderado e pesado. Os dados de tensão, corrente e potência para cada condição de carregamento analisada são apresentados nas Tabelas 5.1, 5.2, e 5.3. Essas informações foram obtidas a partir do banco de dados do Operador Nacional de Sistemas Elétricos (ONS), e os resultados obtidos por meio do ANAREDE, *software* formalmente adotado pelo setor elétrico brasileiro para estudos de fluxo de potência.

Tabela 5.1: Carregamentos da Linha de Transmissão de 138 kV.

Grandeza Elétrica	Leve	Moderado	Pesado
V_S (pu)	1.009 \angle -15°	1.019 \angle -48.6°	1.008 \angle -70.5°
I_S (A)	159.6	290.1	272.4
P_S (MW)	36.9	9.5	65.6
Q_S (MVar)	-10.8	-3.5	-2.8
V_R (pu)	1.007 \angle -17.9°	0.998 \angle -53.8°	0.987 \angle -75.4°
I_R (A)	156.1	289.2	271.6
P_R (MW)	-36.4	-68.6	-63.9
Q_R (MVar)	9.5	6.6	5.2

Tabela 5.2: Carregamentos da Linha de Transmissão de 230 kV.

Grandeza Elétrica	Leve	Moderado	Pesado
V_S (pu)	1.04 \angle -14.7°	1.029 \angle -47.9°	1.028 \angle -69.8°
I_S (A)	6.8	323.3	308.4
P_S (MW)	2.8	135.1	126.1
Q_S (MVar)	0.2	-18.8	-7.1
V_R (pu)	1.035 \angle -14.7°	1.024 \angle -52.9°	1.016 \angle -74.6°
I_R (A)	32.7	319	306.9
P_R (MW)	-2.8	-129	-124.1
Q_R (MVar)	-13.2	17.4	5

Tabela 5.3: Carregamentos da Linha de Transmissão de 500 kV.

Grandeza Elétrica	Leve	Moderado	Pesado
V_S (pu)	1.046 \angle -13°	1.06 \angle -51°	1.06 \angle -74.1°
I_S (A)	241.9	295.4	270.8
P_S (MW)	182	234.6	209.4
Q_S (MVar)	-122.1	-135.7	-134.3
V_R (pu)	1.046 \angle -14.4°	1.061 \angle -52.7°	1.062 \angle -75.6°
I_R (A)	224.3	269.6	244.9
P_R (MW)	-181.7	-234.2	-209
Q_R (MVar)	-91.2	-80.9	-84.1

Para verificar a precisão do algoritmo proposto, foram adicionados deslocamentos, em todos os quadrantes trigonométricos (entre 0° a 360°), aos ângulos de fase dos fasores de tensão e corrente do terminal remoto, R, simulando erros de sincronização nas medições.

Os resultados dessas simulações estão apresentados na Tabela 5.4, em que é possível observar que o erro absoluto do ângulo de sincronização cresce com o aumento do carregamento da linha, esses desvios permanecem desprezíveis em todos os cenários analisados. Para todas as situações testadas, um erro absoluto máximo de

Tabela 5.4: Erro Absoluto de Sincronização para Dados do ANAREDE

Carregamento	138 kV	230 kV	500 kV
Leve	0.001553°	0.009395°	0.003312°
Moderado	0.08350°	0.034815°	0.021272°
Pesado	0.045588°	0.094339°	0.063664°

0.094339° foi verificado, para um cenário de carregamento pesado na linha de 230 kV avaliada. Considerando uma taxa de amostragem igual a 256 amostras por ciclo esse erro corresponde à 0.0671 amostras.

A fim de avaliar melhor a metodologia de sincronização de medições de dois terminais proposta, foi desenvolvida uma equação biquadrada, apresentada no tópico 5.1.2.1. Esse método proporcionou testar diversos cenários de operação do sistema elétrico, incluindo diferentes valores de fator de potência, carregamento, e comprimento da linha.

5.1.2 Avaliação do Método Proposto Usando Dados da Equação Biquadrada

Nesta seção estão presentes a formulação da equação biquadrada, os casos testados e os resultados obtidos.

5.1.2.1 Formulação da Equação Biquadrada

A formulação descrita nesse tópico foi aprimorada a partir da metodologia descrita em (Cespedes 1990), mas com a diferença de que, neste trabalho, foram considerados os elementos *shunt*. O método é baseado no circuito equivalente da linha de transmissão ilustrado na Figura 5.1. Com base nessa Figura, e considerando um determinado nó como referência pode-se derivar a equação usada para calcular a magnitude e o ângulo da tensão no terminal receptor, R da LT.

Na Figura 5.1, os subscritos S e R referem-se, respectivamente, as variáveis analisadas nos terminais emissor (Barra S) e receptor (Barra R) da LT monitorada. Primeiramente, considere que a potência aparente por fase de uma determinada carga a ser conectada ao terminal remoto da LT (Barra R) é representada por:

$$\mathbf{S} = P + jQ = \hat{V}_R \hat{I}_R^* , \quad (5.1)$$

em que P e Q representam, respectivamente, a potência ativa e reativa por fase na

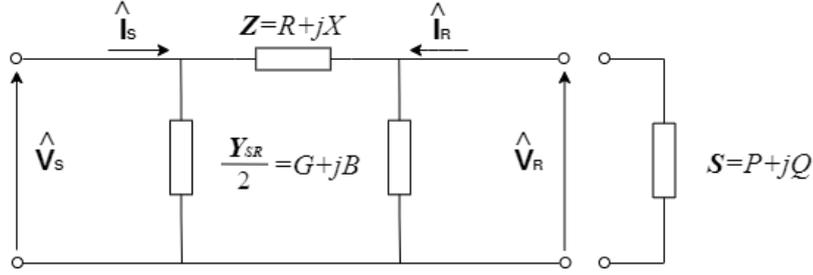


Figura 5.1: Circuito equivalente da linha de transmissão.

extremidade receptora, sendo \vec{V}_R e \vec{I}_R os fasores de tensão e corrente por fase no barramento R, respectivamente.

Tomando o nó S como referência, e fazendo algumas manipulações matemáticas na equação (5.1), obtém-se:

$$V_S V_R (\cos \theta - j \operatorname{sen} \theta) = V_R^2 [(1 + RG - XB) + j(RB + XG)] - (PR + QX) + j(QR - PX), \quad (5.2)$$

em que, θ é o ângulo de fase de \vec{V}_R , R e X são as resistências e reatâncias série da linha, respectivamente, e G e B são, respectivamente, as condutâncias e susceptâncias *shunt* da linha. A equação (5.2) é de natureza complexa e pode ser separada em duas equações reais, como segue:

$$V_S V_R \cos \theta = V_R^2 (1 + RG - XB) - (PR + QX), \quad (5.3)$$

$$-V_S V_R \operatorname{sen} \theta = V_R^2 (RB + XG) + (QR - PX). \quad (5.4)$$

Elevando ao quadrado as equações (5.3) e (5.4) e, em seguida, somando-as, obtém-se a seguinte equação biquadrada:

$$V_R^4 [1 + 2(RG - XB) + Z^2 Y^2] + V_R^2 \{-2[Z^2(GP - BQ) + (RP + XQ)] - V_S^2\} + Z^2 S^2 = 0, \quad (5.5)$$

em que Z e Y são os módulos da impedância série e da admitância *shunt* da linha,

respectivamente. Portanto, definindo-se:

$$\begin{aligned} a &= 1 + 2(RG - XB) + Z^2 Y^2 , \\ b &= -2 [Z^2(GP - BQ) + (RP + XQ)] - V_S^2 , \\ c &= Z^2 S^2 , \end{aligned}$$

a equação biquadrada pode ser reescrita como segue:

$$aV_R^4 + bV_R^2 + c = 0 . \quad (5.6)$$

Dentre as quatro possíveis soluções obtidas de (5.6), a única compatível com o circuito real para calcular o módulo da tensão do terminal remoto é:

$$V_R = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} . \quad (5.7)$$

Considerando a relação entre (5.3) e (5.4), o ângulo de fase da tensão \vec{V}_R pode ser calculado como:

$$\theta = \text{tg}^{-1} \left(-\frac{d_2}{d_1} \right) , \quad (5.8)$$

em que,

$$\begin{aligned} d_1 &= V_R^2(1 + RG - XB) - (PR + QX) , \\ d_2 &= V_R^2(RB + XG) + (QR - PX) , \end{aligned}$$

de modo que o fasor de tensão do barramento remoto $V_R \angle \theta$ pode ser calculado usando (5.7) e (5.8).

5.1.2.2 Considerações Gerais

Neste trabalho, todas as condições de carregamento testadas foram modeladas para LTs de 138 kV, 230 kV e 500 kV/60 Hz instaladas na rede elétrica brasileira. As linhas foram simuladas por meio de modelos de linhas a parâmetros distribuídos, considerando a presença de impedâncias série e admitâncias *shunt*, cujos valores são apresentados nas Tabelas 5.5, 5.6 e 5.7.

Os testes foram realizados variando-se a capacidade de carga da linha de 0,2 a 1,2 a uma taxa de 0,1. Cada condição de carregamento da linha foi testada para fatores de potência atrasados de 0,85 a 1, com uma taxa de variação de 0,01. Além disso,

para analisar o efeito capacitivo da linha, foram avaliados vários comprimentos de linha, variando-os de 20 km a 600 km, em passos de 20 km.

Neste trabalho, a capacidade de carregamento da LT foi definida com base no carregamento da linha pela impedância de surto (Surge Impedance Loading - SIL) ou potência natural, que fornece uma referência para especificar a carga máxima aproximada da linha analisada, calculada da seguinte forma:

$$SIL = \frac{V_u^2}{Z_s}, \quad (5.9)$$

em que V_u é a tensão de linha nominal da LT, e Z_s o valor da impedância de surto.

Vale ressaltar que o carregamento é função do comprimento da linha de transmissão, de forma que certas restrições devem ser atendidas. Linhas curtas com comprimentos menores que 100 km podem ser carregadas com mais de três vezes o SIL, desde que seus limites térmicos não sejam ultrapassados. Linhas médias com comprimentos de cerca de 100-300 km podem ser carregadas de 1,5 a 3 vezes o SIL, sem que a queda de tensão na linha exceda 5%. Por fim, linhas longas com comprimentos acima de 300 km podem ser carregadas com valores de potência aproximadamente iguais ao SIL, respeitando seus limites de estabilidade, de forma que o ângulo de fase entre as tensões nos dois terminais não ultrapasse 40° a 45° (Mohan 2012).

Tabela 5.5: Parâmetros da rede de transmissão de 138 kV/60 Hz.

Parâmetro	Valor
Comprimento (km)	55
Impedância Série (Ω/km)	0.1548 + j0.5035
Admitância <i>Shunt</i> ($\mu\text{S}/\text{km}$)	j3.2843

Tabela 5.6: Parâmetros da rede de transmissão de 230 kV/60 Hz.

Parâmetro	Valor
Comprimento (km)	97.1
Impedância Série (Ω/km)	0.0981 + j0.5007
Admitância <i>Shunt</i> ($\mu\text{S}/\text{km}$)	j3.3602

Tabela 5.7: Parâmetros da rede de transmissão de 500 kV/60 Hz.

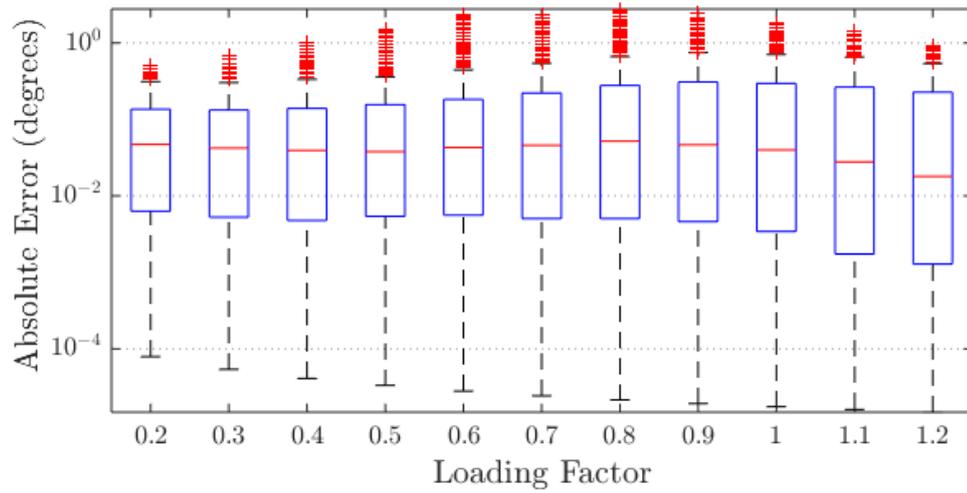
Parâmetro	Valor
Comprimento (km)	229.1
Impedância Série (Ω/km)	0.0178 + j0.2804
Admitância <i>Shunt</i> ($\mu\text{S}/\text{km}$)	j6.4893

Embora a capacidade de carga de linhas médias e longas possa ser incrementada utilizando-se compensadores em série e em derivação *shunt* (Mohan 2012), esses casos não são estudados aqui, pois são uma extensão dos cenários avaliados. Neste trabalho, para LTs de até 100 km de extensão, foi adotado um carregamento igual a três vezes o valor do SIL. Para linhas maiores ou iguais a 100 km e menores que 200 km, foi definida uma carga de duas vezes o SIL, enquanto para comprimentos de linha maiores ou iguais a 200 km e menores a 300 km, uma vez e meia o SIL. Finalmente, para linhas maiores ou iguais a 300 km, foi utilizada uma capacidade de carga igual ao SIL.

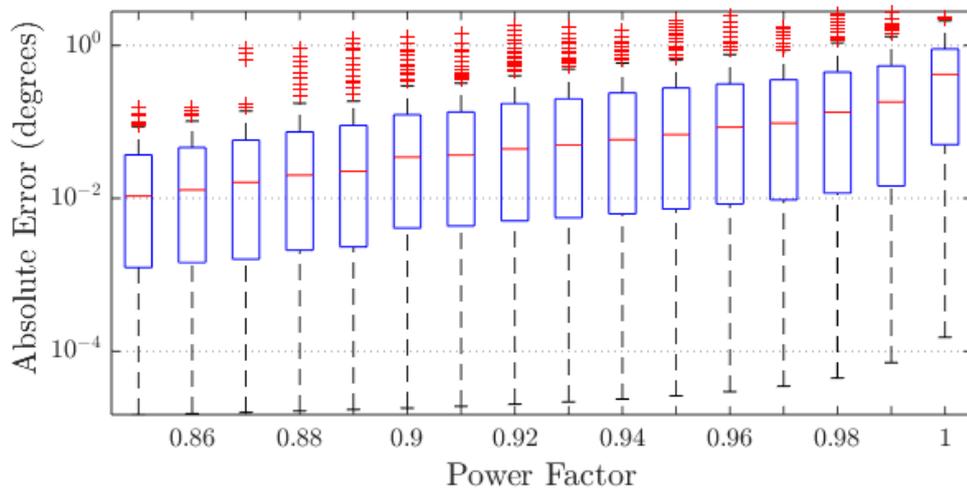
As condições de carregamento das linhas simuladas neste trabalho foram modeladas por meio de parâmetros reais, utilizando a equação biquadrada. A partir dos resultados da equação biquadrada, foram considerados apenas os casos com valores de tensão dentro dos limites estabelecidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica. Nos testes realizados, para fins de simplificação, os valores de tensão foram ajustados na faixa de 0,93 a 1,07 pu, caso contrário, supôs-se a existência de uma condição crítica. Aqui, deslocamentos de fase entre 0° e 360° (ou seja, em todos os quadrantes trigonométricos) também foram introduzidos nos fasores do terminal R, a fim de testar a eficácia do algoritmo de sincronização de medições proposto.

5.1.2.3 Resultados

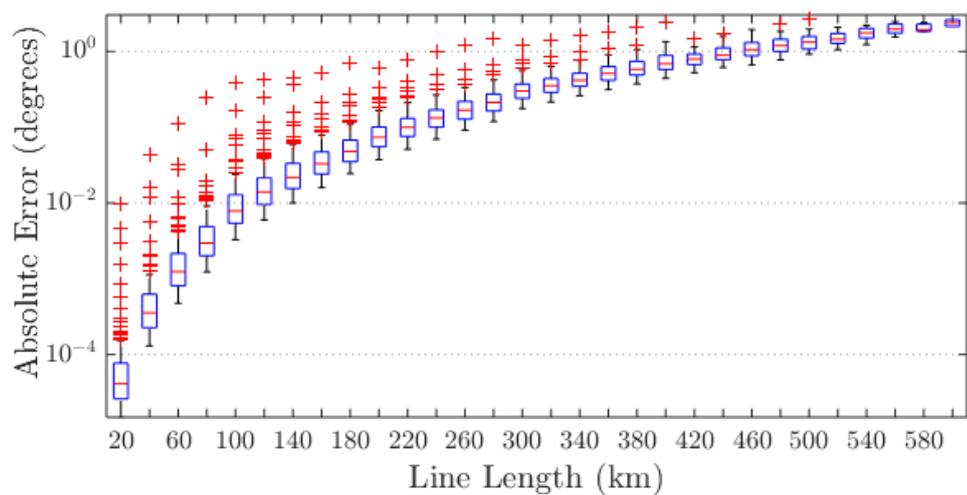
Os resultados, para cada cenário, foram representados em formato de *boxplot*, que consiste em uma forma padronizada para ilustrar a distribuição dos dados com base nos seguintes índices: 1) *outliers*, representados por sinais de adição, representam pontos numericamente distantes dos demais dados; 2) valor máximo, representado pela cauda superior, excluindo os *outliers*; 3) quartil superior, representado pelo limite superior da caixa, indicando que 75% dos valores da amostra de dados são menores que este valor; 4) mediana, representada pela linha intermediária da caixa, significando que 50% dos valores da amostra de dados são menores ou iguais a este valor; 5) quartil inferior, representado pelo limite inferior da caixa, o que significa que 25% dos valores da amostra de dados são menores que este valor; e 6) valor mínimo, representado pela cauda inferior, excluindo os *outliers*. Das Figuras 5.2(a) a 5.4(c) os boxplots são apresentados para cada cenário de operação e níveis de tensão.



(a)

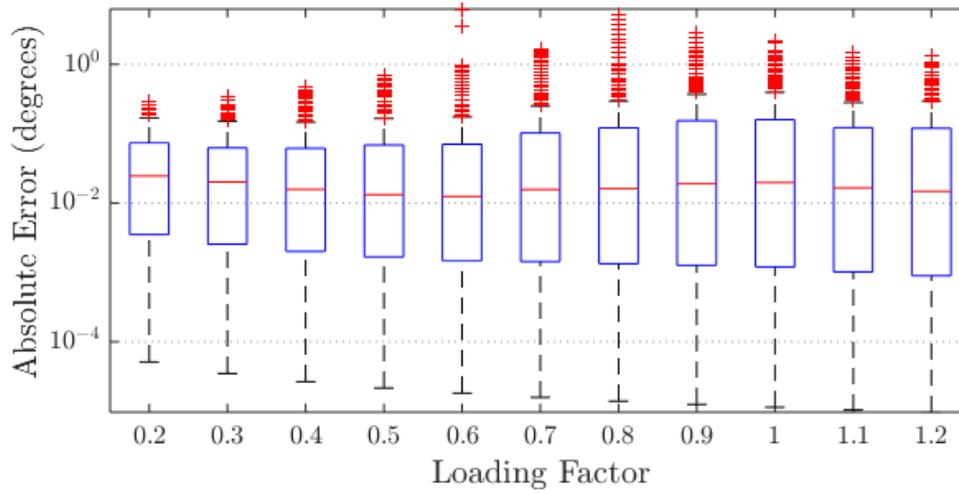


(b)

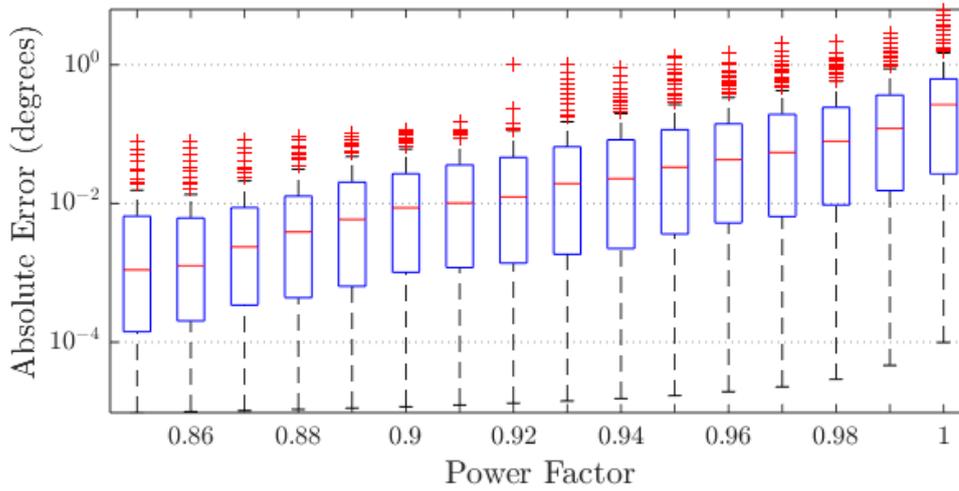


(c)

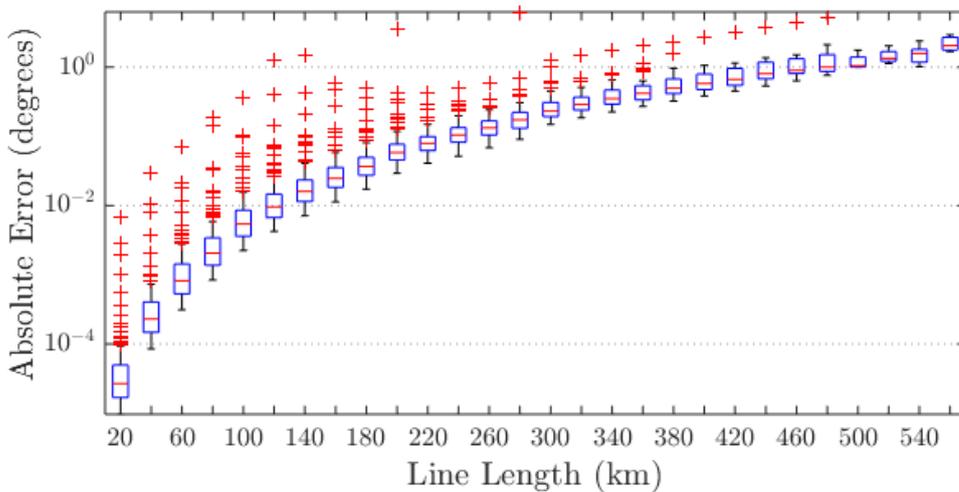
Figura 5.2: Synchronization absolute error calculated via the proposed algorithm for 138 kV line considering: (a) line loading variation; (b) power factor variation; (c) line length variation.



(a)

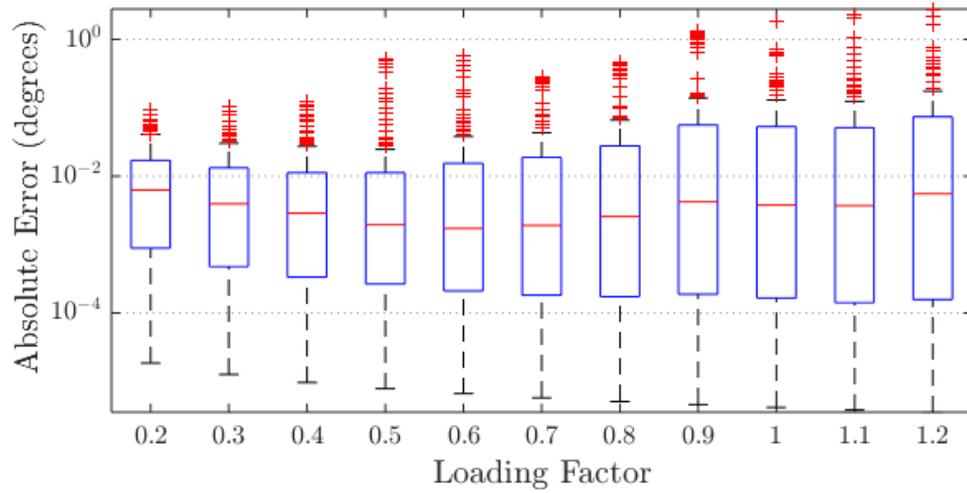


(b)

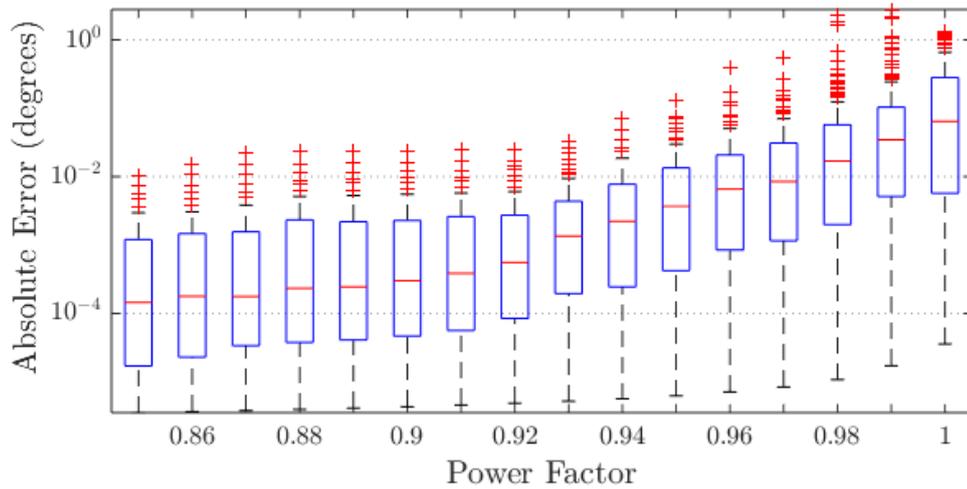


(c)

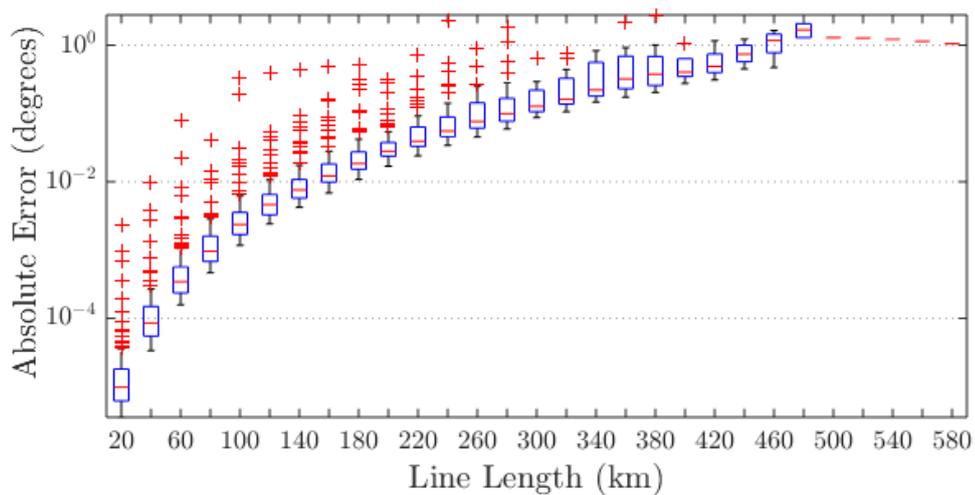
Figura 5.3: Synchronization absolute error calculated via the proposed algorithm for 230 kV line considering: (a) line loading variation; (b) power factor variation; (c) line length variation.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.4: Synchronization absolute error calculated via the proposed algorithm for 500 kV line considering: (a) line loading variation; (b) power factor variation; (c) line length variation.

O desempenho do algoritmo proposto para várias condições de carregamento da LT está representado a partir das figuras 5.2(a), 5.3(a), e 5.4(a). Apenas pequenas variações nos erros obtidos são verificadas nestas figuras, atestando que o método de sincronização proposto é de fato confiável sob qualquer condição de carregamento da linha. Enquanto isso, os erros tendem a aumentar à medida que o fator de potência aumenta, conforme mostrado nas Figuras 5.2(b), 5.3(b), e 5.4(b). Porém, é importante mencionar que esses erros ainda são aceitáveis em aplicações baseadas em fasores, uma vez que não ultrapassam a ordem de alguns graus.

As Figuras 5.2(c), 5.3(c), e 5.4(c) mostram *boxplots* obtidos quando diferentes comprimentos de linha são considerados. Nestes casos, os erros absolutos são maiores para linhas mais longas. Este comportamento está diretamente relacionado ao aumento da condutância *shunt* da linha, que é desconsiderada na formulação do método proposto. Para os níveis de tensão de 230 kV e 500 kV, observa-se que não há resultados para todos os comprimentos de linha. Isso ocorre porque as tensões no terminal receptor associada ao cenário de operação do sistema elétrico estão fora dos limites práticos estabelecidos. No entanto, pode-se notar que todos os erros nos cenários realistas resultaram em uma precisão promissora do método de sincronização proposto, atestando sua confiabilidade para diferentes comprimentos de linha.

Com o objetivo de fornecer uma visão geral dos resultados estatísticos obtidos, um *boxplot* unificado dos erros de sincronização absolutos obtidos é apresentado para cada nível de tensão da LT, considerando os três cenários simulados em conjunto, especificamente, variação do fator de potência, variação do nível de carregamento e variação do comprimento da linha. Os índices de tais *boxplots* unificados estão resumidos na Tabela 5.8.

Os resultados mostram que o algoritmo de sincronização apresentou 25% dos erros abaixo de 0.0043° , 50% abaixo de 0.0411° , e 75% abaixo de 0.1830° para a LT de 138 kV. Os erros de sincronização mínimo e máximo não excederam 1.4832×10^{-5} , e 0.4494° , respectivamente. O desempenho do algoritmo proposto para as linhas de transmissão de 230 kV e 500 kV avaliadas também pode ser analisado a partir dos dados ilustrados na Tabela 5.8. Pode-se observar que os resultados gerais obtidos para as linhas de 230 kV e 500 kV são ainda mais promissores, demonstrando a confiabilidade e precisão do método de sincronização de medições proposto.

Tabela 5.8: Dados de erros de sincronização extraídos dos *boxplots* unificados

Erros de Sincronização (graus)			
Índices	138 kV	230 kV	500 kV
Calda Inferior	1.4832×10^{-5}	9.6628×10^{-6}	3.5390×10^{-6}
Quartil Inferior	0.0043	0.0016	0.0002
Mediana	0.0411	0.0171	0.0032
Quartil Superior	0.1830	0.0895	0.0220
Cauda Superior	0.4494	0.2172	0.0541

5.2 Avaliação da Metodologia de Localização de Faltas

Para avaliar o desempenho do método de localização de faltas proposto, optou-se por simular no ATP a mesma rede elétrica utilizada em (Apostolopoulos & Korres 2010), LT não transposta modelada a parâmetros distribuídos, e uma comparação entre essas metodologias foi realizada, tendo em vista que a técnica proposta se baseia no equacionamento desenvolvido por esses autores. Assim como apresentado em (Apostolopoulos & Korres 2010), também foi exibido o método proposto em (Liao 2008), que emprega apenas tensões e correntes pós-falta de sequência positiva e negativa e não considera os impactos da capacitância *shunt*.

Foi simulado o modelo de LT não transposta a parâmetros distribuídos assimétrico de K.C. Lee, para um nível de tensão de 400 kV, frequência da rede de 50 Hz e 300 km de comprimento. Na tabela 5.9 estão apresentados os parâmetros da LT no domínio modal, a matriz de transformação modal, T_i , e os sistemas equivalentes nos terminais da linha.

Com o intuito de apresentar os erros do próprio modelo, os transformadores de corrente e tensão foram modelados intencionalmente como ideais. Os sinais de tensão e corrente foram amostrados a uma taxa de 1000 Hz, e a transformada de Fourier de um ciclo foi utilizada para extração dos fasores de tensão e correntes. Para simular o erro de sincronização todos os fasores do terminal R foram, em todos os casos, rotacionados de 10° , assim como em (Apostolopoulos & Korres 2010). Os dados pré falta foram obtidos um ciclo antes da falta, e os dados pós falta 5 ciclos após a falta. O algoritmo proposto foi implementado no *software* Matlab[®], e a expressão 5.10 foi utilizada para quantificar a precisão desse algoritmo.

$$Erro(\%) = \frac{|Local\ real - Local\ estimado|}{Comprimento\ total\ da\ linha} \times 100 \quad (5.10)$$

Tabela 5.9: Parâmetros da rede de transmissão de 400 kV, 50 Hz.

Componente	Parâmetro	
Linha SR	L	300 km
	Z'_{0L}	$(0.3140 + j1.0041)\Omega/km$
	B'_{0L}	$2.4916\mu S/km$
	Z'_{1L}	$(0.0247 + j0.3189)\Omega/km$
	B'_{1L}	$3.6128\mu S/km$
	Z'_{2L}	$(0.0239 + j0.2604)\Omega/km$
	B'_{2L}	$4.3040\mu S/km$
	$T_i =$	$\begin{bmatrix} 0.59521098 & -0.70710678 & -41240852 \\ 0.53985903 & 0 & 0.81230439 \\ 0.59521098 & 0.70710678 & -41240852 \end{bmatrix}$
Sistema equivalente no terminal S	Z_{1S}	$(1.312 + j15)\Omega$
	Z_{0S}	$(2.334 + j26.6)\Omega$
	E_S	$1.00\angle 0^\circ$ pu
Sistema equivalente no terminal R	Z_{1R}	$(2.624 + j30)\Omega$
	Z_{0R}	$(4.668 + j53.2)\Omega$
	E_R	$0.99\angle -20^\circ$ pu

Os diversos cenários de faltas simulados para testar a precisão do algoritmo estão descritos na tabela 5.10.

Tabela 5.10: Características das faltas simuladas.

Tipo de Falta	Resistência de Falta (Ω)	Distância de Falta (km)
AT-BT-CT	10, 100	
AB-BC-CA	1, 10	
ABT-BCT-CAT	5, 50	60, 120, 180, 240
ABC	0	

São apresentadas nas tabelas 5.11, 5.12 e 5.13 as estimativas dos locais de falta, a partir do terminal S, para faltas assimétricas; fase-terra, fase-fase e fase-fase-terra. O tipo de falta, resistência de falta e o local atual da falta são dados na primeira, segunda e terceira colunas, respectivamente. O local estimado para a distância de falta é apresentado na quarta, quinta e sexta colunas, para o algoritmo proposto em (Apostolopoulos & Korres 2010), (Liao 2008), e o algoritmo proposto nesse trabalho, respectivamente. Nas três últimas colunas são indicados os erros percentuais de cada estimativa, na mesma ordem.

Analisando a tabela 5.11 observa-se que o maior erro encontrado pelo algoritmo proposto em (Apostolopoulos & Korres 2010), para faltas envolvendo uma fase e a terra, foi 0.176%, 25.36% para o algoritmo proposto em (Liao 2008), e 0.398% para

Tabela 5.11: Distância de falta estimada para faltas fase-terra.

Tipo de Falta	Resistência de Falta	Local da Falta (pu)	Distância Estimada (pu)			Erro de Localização (%)		
			AP.	LIAO	Prop.	AP.	LIAO	Prop.
AT	10 Ω	0.2	0.201	0.239	0.202	0.113	3.927	0.186
		0.4	0.401	0.445	0.400	0.106	4.453	0.007
		0.6	0.600	0.641	0.598	0.006	4.1 17	0.223
		0.8	0.800	0.816	0.799	0.016	1.578	0.137
	100 Ω	0.2	0.201	0.224	0.200	0.117	2.356	0.040
		0.4	0.401	0.604	0.401	0.094	2.043	0.136
		0.6	0.600	0.854	0.599	0.008	2.536	0.083
		0.8	0.799	1.034	0.797	0.080	2.338	0.264
BT	10 Ω	0.2	0.202	0.176	0.199	0.176	2.430	0.135
		0.4	0.401	0.403	0.401	0.113	0.330	0.099
		0.6	0.600	0.637	0.599	0.028	3.698	0.090
		0.8	0.800	0.814	0.797	0.019	1.37 1	0.325
	100 Ω	0.2	0.201	0.113	0.202	0.125	8.674	0.166
		0.4	0.401	0.312	0.400	0.130	8.839	0.027
		0.6	0.601	0.587	0.601	0.051	1.308	0.120
		0.8	0.800	0.806	0.799	0.026	0.553	0.105
CT	10 Ω	0.2	0.201	0.200	0.201	0.083	0.014	0.119
		0.4	0.401	0.371	0.399	0.117	2.928	0.077
		0.6	0.600	0.542	0.601	0.042	5.797	0.050
		0.8	0.800	0.709	0.798	0.018	9.103	0.222
	100 Ω	0.2	0.201	0.246	0.203	0.108	4.599	0.274
		0.4	0.401	0.392	0.401	0.118	0.755	0.093
		0.6	0.601	0.540	0.598	0.065	6.005	0.170
		0.8	0.800	0.684	0.796	0.007	1.156	0.398

a técnica proposta neste trabalho.

Para faltas envolvendo duas fases, a partir da tabela 5.12, os erros máximos encontrados, respectivamente, para a metodologia em (Apostolopoulos & Korres 2010), (Liao 2008), e neste trabalho foram 0.291%, 5.957% e 0.545%.

No caso de faltas bifásicas envolvendo a terra, tabela 5.13, os erros de localização de falta para a metodologia desenvolvida por (Apostolopoulos & Korres 2010), (Liao 2008), e pela proposta neste trabalho foram 0.327%, 6.570% e 0.781%, respectivamente.

Na tabela 5.14 são apresentadas as estimativas dos locais de falta e seus respectivos erros percentuais para uma falta simétrica. Neste caso, não há comparação entre as metodologias relacionadas anteriormente, pois, em (Apostolopoulos & Korres 2010) esses resultados não foram apresentados, embora os autores afirmem

Tabela 5.12: Distância de falta estimada para faltas fase-fase.

Tipo de Falta	Resistência de Falta	Local da Falta (pu)	Distância Estimada (pu)			Erro de Localização (%)		
			AP.	LIAO	Prop.	AP.	LIAO	Prop.
AB	1 Ω	0.2	0.201	0.219	0.201	0.122	1.857	0.093
		0.4	0.401	0.418	0.401	0.089	1.765	0.093
		0.6	0.600	0.622	0.597	0.039	2.235	0.322
		0.8	0.797	0.796	0.798	0.291	0.372	0.206
	10 Ω	0.2	0.201	0.216	0.201	0.121	1.634	0.063
		0.4	0.401	0.418	0.398	0.099	1.786	0.196
		0.6	0.601	0.629	0.600	0.050	2.887	0.035
		0.8	0.798	0.815	0.798	0.173	1.541	0.230
BC	1 Ω	0.2	0.201	0.197	0.202	0.138	0.281	0.233
		0.4	0.401	0.387	0.402	0.105	1.256	0.161
		0.6	0.600	0.575	0.599	0.044	2.519	0.051
		0.8	0.799	0.746	0.799	0.144	5.369	0.124
	10 Ω	0.2	0.201	0.198	0.202	0.130	0.223	0.201
		0.4	0.401	0.386	0.400	0.111	1.428	0.025
		0.6	0.600	0.571	0.603	0.042	2.892	0.262
		0.8	0.799	0.740	0.800	0.062	5.957	0.035
CA	1 Ω	0.2	0.201	0.210	0.202	0.130	0.953	0.219
		0.4	0.400	0.402	0.403	0.012	0.158	0.313
		0.6	0.600	0.592	0.598	0.007	0.819	0.157
		0.8	0.801	0.765	0.795	0.101	3.492	0.545
	10 Ω	0.2	0.201	0.212	0.202	0.127	1.151	0.239
		0.4	0.401	0.404	0.401	0.080	0.439	0.091
		0.6	0.600	0.594	0.599	0.009	0.637	0.135
		0.8	0.800	0.765	0.797	0.028	3.466	0.344

que a técnica proposta também é válida para faltas simétricas, e, o método proposto em (Liao 2008) funciona apenas para faltas assimétricas. Observa-se que para esse tipo de falta o algoritmo proposto apresenta um erro máximo de 1.051%.

O erro absoluto de sincronização estimado pela metodologia proposta na seção 4.1, e para o SEP simulado nessa subseção, foi 0.269° para todas as faltas simuladas. Já era de se esperar que esse erro de sincronização fosse o mesmo para qualquer condição de falta, já que essa metodologia depende apenas de valores de tensão e corrente pré falta em ambos os terminais da linha.

Em (Apostolopoulos & Korres 2010) e (Liao 2008) o ângulo de sincronização estimado depende de procedimentos iterativos. Para cada falta simulada os algoritmos encontram valores diferentes para o ângulo calculado. Em (Apostolopoulos & Korres 2010), após o segundo procedimento iterativo, o erro absoluto máximo en-

Tabela 5.13: Distância de falta estimada para faltas fase-fase-terra.

Tipo de Falta	Resistência de Falta	Local da Falta (pu)	Distância Estimada (pu)			Erro de Localização (%)		
			AP.	LIAO	Prop.	AP.	LIAO	Prop.
ABT	5 Ω	0.2	0.201	0.222	0.201	0.123	2.171	0.077
		0.4	0.401	0.420	0.398	0.091	2.042	0.207
		0.6	0.600	0.628	0.600	0.031	2.795	0.006
		0.8	0.797	0.795	0.798	0.327	0.509	0.229
	50 Ω	0.2	0.201	0.220	0.202	0.122	1.948	0.236
		0.4	0.401	0.419	0.400	0.089	1.914	0.050
		0.6	0.600	0.626	0.598	0.028	2.644	0.208
		0.8	0.797	0.801	0.796	0.295	0.122	0.389
BCT	5 Ω	0.2	0.201	0.197	0.202	0.144	0.319	0.192
		0.4	0.401	0.385	0.400	0.102	1.465	0.007
		0.6	0.601	0.569	0.598	0.048	3.116	0.203
		0.8	0.798	0.734	0.800	0.190	6.570	0.006
	50 Ω	0.2	0.201	0.198	0.200	0.137	0.232	0.024
		0.4	0.401	0.387	0.402	0.104	1.278	0.174
		0.6	0.601	0.573	0.600	0.048	2.694	0.047
		0.8	0.799	0.742	0.797	0.151	5.770	0.301
CAT	5 Ω	0.2	0.201	0.207	0.202	0.134	0.646	0.235
		0.4	0.400	0.401	0.392	0.024	0.093	0.781
		0.6	0.600	0.595	0.599	0.015	0.462	0.150
		0.8	0.802	0.778	0.797	0.167	2.169	0.341
	50 Ω	0.2	0.201	0.208	0.201	0.132	0.804	0.132
		0.4	0.400	0.400	0.399	0.010	0.006	0.068
		0.6	0.600	0.591	0.601	0.007	0.899	0.051
		0.8	0.802	0.766	0.799	0.162	3.360	0.120

Tabela 5.14: Distância de falta estimada pelo algoritmo proposto para faltas trifásicas.

Tipo de Falta	Resistência de Falta	Local da Falta (pu)	Distância Estimada (pu)	Erro de Localização (%)
ABC	0 Ω	0.2	0.202	0.198
		0.4	0.399	0.106
		0.6	0.596	0.355
		0.8	0.811	1.051

contrado foi de 0.22° . Em todas as situações de faltas simuladas este algoritmo não ultrapassou 9 iterações para convergir, considerando ambos os processos iterativos. Já em (Liao 2008), ocorreu um erro absoluto máximo de 20° , e foram necessárias 6 iterações. Para as demais situações, o algoritmo convergiu em no máximo 8 itera-

ções. Esses ângulos de sincronização estimados, bem como a quantidade de iterações necessárias para cada um desses algoritmos convergirem podem ser encontrados nas tabelas III, V e VII exibidas em (Apostolopoulos & Korres 2010), para faltas fase-terra, fase-fase e fase-fase-terra, respectivamente.

O método de localização de faltas proposto nesta seção apresentou desempenho um pouco inferior quando comparado com o proposto em (Apostolopoulos & Korres 2010), porém apresenta a vantagem de não utilizar processos iterativos para estimar a distância de falta, podendo dessa maneira garantir sempre uma resposta.

Métodos iterativos para cálculo de uma raiz de uma equação exigem uma boa estimativa da solução, para iniciar o processo. Como o ângulo de sincronização representa um erro, costuma-se inicializar o cálculo iterativo com uma estimativa inicial igual a zero. Assim, o processo iterativo converge (quando for o caso) para a solução mais próxima de zero. Dessa forma, erros maiores, correspondentes a outras raízes da mesma equação, não poderão ser determinados, por meio dessa metodologia.

Capítulo 6

Conclusão

Neste trabalho foram propostos dois algoritmos baseados em fasores medidos em dois terminais, um para sincronização de dados e o outro para localização de faltas. Ambos apresentam as seguintes vantagens principais:

- Os métodos são independentes de parâmetros elétricos, superando problemas que podem surgir devido às incertezas dos parâmetros de linha;
- O ângulo de sincronização e a distância de falta são obtidos a partir soluções analíticas, de forma que procedimentos iterativos não são necessários, e garantem que sempre haja resposta;
- O efeito capacitivo da linha é totalmente levado em consideração, de forma que as soluções sejam adequadas tanto para linhas curtas como longas.

A metodologia de sincronização de dados, além das vantagens acima citadas dependem apenas das grandezas em regime permanente, de forma que o algoritmo é independente dos transitórios causados por faltas.

A partir da análise de dados reais retirados da rede elétrica brasileira, o erro absoluto de sincronização obtido não ultrapassou $0,094^\circ$, demonstrando que o método proposto é confiável e preciso para aplicações práticas. Considerando os dados obtidos da simulação de equação biquadrática, uma ampla variedade de cenários de operação do sistema elétrico pôde ser simulada, totalizando 32591, 27911 e 19240 de casos simulados para LTs com tensões nominais iguais a 138 kV, 230 kV e 500 kV, respectivamente. Em todos os casos, excluindo os outliers, 75% dos erros calculados foram menores que $0,1830^\circ$, $0,0895^\circ$ e $0,220^\circ$, para as linhas de 138 kV, 230 kV e 500 kV, respectivamente. De fato, o algoritmo foi capaz de identificar o ângulo de sincronização em qualquer quadrante do círculo trigonométrico, mesmo quando os sinais apresentam grandes erros de sincronização. No entanto, é importante mencionar que se ocorrerem deslocamentos angulares maiores que um período, um ângulo

equivalente será estimado pela solução proposta. Portanto, pode ser considerado um método eficaz para procedimentos de sincronização de medições fasoriais via *software*, sendo adequado para aplicações de dois terminais quando o GPS tradicional ou soluções de alinhamento de tempo baseadas em canais de comunicação estão fora de serviço.

No método de localização de faltas proposto são utilizados fasores de frequência fundamental dos dois terminais da LT, antes e durante a ocorrência da falta. Para validar esse algoritmo foram realizadas simulações via ATP, e os resultados foram comparados com os de métodos presentes na literatura. Os resultados obtidos comprovam a eficiência da metodologia proposta, embora tenha apresentado desempenho um pouco inferior quando comparado com o proposto em (Apostolopoulos & Korres 2010). Entretanto possui a vantagem de não utilizar processos iterativos para estimar a distância de falta.

Como sugestões para trabalhos futuros tem-se:

- Aplicação da teoria de propagação de incertezas, na determinação do ângulo de sincronização, para definir uma variância do erro. A partir daí, determinar uma variância do erro de localização da falta.
- Programar um comitê de algoritmos de sincronização composto por três algoritmos, baseados em princípios distintos. 1) componentes transitórias; 2) componentes de regime permanente; 3) ondas viajantes.

Referências Bibliográficas

Ahmed, Tanjila, Sabidur Rahman, Massimo Tornatore & Biswanath Mukherjee (2018), ‘A survey on high-precision time synchronization techniques for optical datacenter networks and a zero-overhead microsecond-accuracy solution.’, Photonic Network Communications **36**, 56–67.

URL: <https://doi.org/10.1007/s11107-018-0773-9>

Apostolopoulos, C. A. & G. N. Korres (2010), ‘A novel algorithm for locating faults on transposed/untransposed transmission lines without utilizing line parameters’, IEEE Transactions on Power Delivery **25**(4), 2328–2338.

Bhargava, B. (1999), Synchronized phasor measurement system project at southern california edison co, em ‘1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.99CH36364)’, Vol. 1, pp. 16–22 vol.1.

Brahma, S. M. & A. A. Girgis (2004), ‘Fault location on a transmission line using synchronized voltage measurements’, IEEE Transactions on Power Delivery **19**(4), 1619–1622.

Cespedes, R. G. (1990), ‘New method for the analysis of distribution networks’, IEEE Transactions on Power Delivery **5**(1), 391–396.

Cruz, Melinda C. S., José J. A. L. Leitão, Sérgio Cauponi, Ewantuy Oliveira & Manoel F. Medeiros Jr. (2012), ‘Experiência com um algoritmo baseado em componentes transitórias para sincronização de registros de falta – um estudo de caso’, Congresso Brasileiro de Automática (CBA) .

Cruz, Melinda C. S., José T. de Oliveira & Manoel F. de Medeiros Júnior (2015), ‘Sincronização de registros oscilográficos em linhas de transmissão com parâmetros elétricos desconhecidos’, VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos

- Davoudi, M., J. Sadeh & E. Kamyab (2015), ‘Parameter-free fault location for transmission lines based on optimisation’, IET Generation, Transmission Distribution **9**(11), 1061–1068.
- Elmore, W.A. (2003), Protective Relaying: Theory and Applications, No Series, Taylor & Francis.
URL: <https://books.google.com.br/books?id=1Jqhp-d-rhoUC>
- Gale, P. F., P. A. Crossley, Xu Bingyin, Ge Yaozhong, B. J. Cory & J. R. G. Barker (1993), Fault location based on travelling waves, em ‘1993 Fifth International Conference on Developments in Power System Protection’, pp. 54–59.
- Girgis, A. A., D. G. Hart & W. L. Peterson (1992), ‘A new fault location technique for two- and three-terminal lines’, IEEE Transactions on Power Delivery **7**(1), 98–107.
- Glover, J.D., M.S. Sarma & T. Overbye (2011), Power System Analysis and Design, Cengage Learning.
URL: <https://books.google.com.br/books?id=U77A2C37QesC>
- Han, Wenhua, Xiaohui Shen, Edwin Hou & Jun Xu (2016), ‘Precision time synchronization control method for smart grid based on wolf colony algorithm’, International Journal of Electrical Power & Energy Systems **78**, 816–822.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061515005682>
- Herlender, J., J. Izykowski & K. Solak (2020), ‘Compensation of the current transformer saturation effects for transmission line fault location with impedance-differential relay’, Electric Power Systems Research **182**, 106223.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779620300304>
- Izykowski, J., R. Molag, E. Rosolowski & M. M. Saha (2006), ‘Accurate location of faults on power transmission lines with use of two-end unsynchronized measurements’, IEEE Transactions on Power Delivery **21**(2), 627–633.
- Izykowski, Jan, Eugeniusz Rosolowski, Przemyslaw Balcerek, Marek Fulczyk & Murari Mohan Saha (2010), ‘Accurate noniterative fault location algorithm utilizing two-end unsynchronized measurements’, IEEE Transactions on Power Delivery **25**(1), 72–80.

- Jiang, J. A., Y. H. Lin, J. Z. Yang, T. M. Too & C. W. Liu (2000), ‘An adaptive pmu based fault detection/location technique for transmission lines. i. theory and algorithms’, IEEE Transactions on Power Delivery **15**(2), 486–493.
- Johns, A. T. & S. Jamali (1990), ‘Accurate fault location technique for power transmission lines’, IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution **137**(6), 395–402.
- Kezunovic, M. & B. Perunicic (1996a), ‘Automated transmission line fault analysis using synchronized sampling at two ends’, IEEE Transactions on Power Systems **11**(1), 441–447.
- Kezunovic, M. & B. Perunicic (1996b), ‘Automated transmission line fault analysis using synchronized sampling at two ends’, IEEE Transactions on Power Systems **11**(1), 441–447.
- Kyriakides, E. & G. T. Heydt (2010), Synchronized measurements in power system operation: International trends and research, em ‘IEEE PES General Meeting’, pp. 1–3.
- Lawrence, D. J., L. Z. Cabeza & L. T. Hochberg (1992), ‘Development of an advanced transmission line fault location system. ii. algorithm development and simulation’, IEEE Transactions on Power Delivery **7**(4), 1972–1983.
- Liao, Y. & N. Kang (2009), ‘Fault-location algorithms without utilizing line parameters based on the distributed parameter line model’, IEEE Transactions on Power Delivery **24**(2), 579–584.
- Liao, Y. & S. Elangovan (2006), ‘Unsynchronised two-terminal transmission-line fault-location without using line parameters’, IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution **153**(6), 639–643.
- Liao, Yuan (2008), ‘Transmission line fault location algorithms without requiring line parameters’, Electric Power Components and Systems **36**(11), 1218–1225.
URL: <https://doi.org/10.1080/15325000802084711>
- Liu, Chih-Wen (2002), Phasor measurement applications in taiwan, em ‘IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition’, Vol. 1, pp. 490–493 vol.1.

- Lopes, F. V., K. M. Dantas, K. M. Silva & F. B. Costa (2018), ‘Accurate two-terminal transmission line fault location using traveling waves’, IEEE Transactions on Power Delivery **33**(2), 873–880.
- Lopes, Felipe V., Tiago R. Honorato, Gustavo A. Cunha, Nilo S.S. Ribeiro, Paulo Lima, Andrei Coelho & Daniel Becker (2021), ‘Adaptive traveling wave-based algorithm for time alignment of transmission line fault records’, Electric Power Systems Research **196**, 107258.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877962100239X>
- Lopes, Felipe Vigolvinho (2014), *Localização de Faltas em Tempo Real Baseada na Teoria de Ondas Viajantes Usando Dados Não Sincronizados de Dois Terminais*, Tese de doutorado, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).
- Mohan, Ned (2012), Electric Power Systems: A First Course, Wiley.
- Monteiro, Roana D. S., Melinda C. S. Cruz, Juliana O. Medeiros, José T. Oliveira, Sérgio Cauponi & Manoel F. Medeiros Jr. (2018), ‘Um novo algoritmo para sincronização de registros oscilográficos em linhas de transmissão com parâmetros elétricos desconhecidos.’, Congresso Brasileiro de Automática (CBA) .
- Pajuelo, E., G. Ramakrishna & M.S. Sachdev (2010), ‘Strengths and limitations of a new phasor estimation technique to reduce ccvt impact in distance protection’, Electric Power Systems Research **80**(4), 417–425.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877960900234X>
- Pardo-Zamora, Oscar N., Rene de J. Romero-Troncoso, Jesus R. Millan-Almaraz, Daniel Morinigo-Sotelo & Roque A. Osornio-Rios (2021), ‘Methodology for power quality measurement synchronization based on gps pulse-per-second algorithm’, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement **70**, 1–9.
- Phadke, Arun & J.s Thorp (2017), Synchronized Phasor Measurements and Their Applications.
- Radojevic, Zoran, Chul-Hwan Kim, M. Popov, G Preston & V Terzija (2009), ‘New approach for fault location on transmission lines not requiring line parameters’, International Conference on Power Systems Transients (IPST2009), Kyoto, Japan, Jun 3-6 .

- Reis, Raphael Leite de Andrade, Washington Luiz Araújo Neves, Felipe V. Lopes & Damásio Fernandes (2019), ‘Coupling capacitor voltage transformers models and impacts on electric power systems: A review’, IEEE Transactions on Power Delivery **34**(5), 1874–1884.
- Saha, Mohan, Jan Jozef Izykowski & Eugeniusz Rosolowski (2010), Fault Location on Power Networks, Springer-Verlag London.
- Xie, Xiaorong, Yaozhong Xin, Jinyu Xiao, Jingtao Wu & Yingdao Han (2006), ‘Wams applications in chinese power systems’, IEEE Power and Energy Magazine **4**(1), 54–63.
- Yi, K.K., J.B. Choo, S.H. Yoon, T.S. Lee, B.C. Park, H.K. Nam, S.G. Song & K.S. Shim (2001), Development of wide area measurement and dynamic security assessment systems in korea, em ‘2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262)’, Vol. 3, pp. 1495–1499 vol.3.
- Yu, Chi-Shan, Chih-Wen Liu, Sun-Li Yu & Joe-Air Jiang (2002), ‘A new pmu-based fault location algorithm for series compensated lines’, IEEE Transactions on Power Delivery **17**(1), 33–46.