

Universidade Federal Fluminense

DANILO PINTO MOREIRA DE SOUZA

**Localização de Falhas em Linha de Transmissão de
Energia pela Análise da Função de Autocorrelação**

VOLTA REDONDA

2018

DANILO PINTO MOREIRA DE SOUZA

Localização de Falhas em Linha de Transmissão de Energia pela Análise da Função de Autocorrelação

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia. Área de Concentração: Modelagem Computacional.

Orientador:

Eliane da Silva Crhisto

Coorientador:

Aryfrance Rocha Almeida

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

VOLTA REDONDA

2018

Localização de Faltas em Linha de Transmissão de Energia pela Análise da Função de Autocorrelação

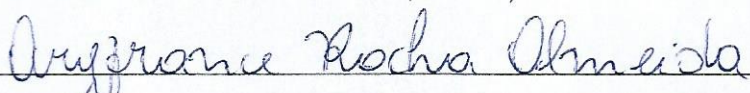
Daniilo Pinto Moreira de Souza

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia. Área de Concentração: Modelagem Computacional.

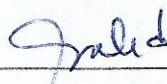
Aprovada por:



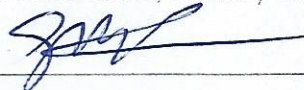
Prof^ª. Eliane da Silva Christo, D.Sc. / MCCT-UFF



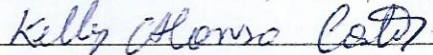
Prof. Aryfrance Rocha Almeida, D.Sc. / CT-UFPI



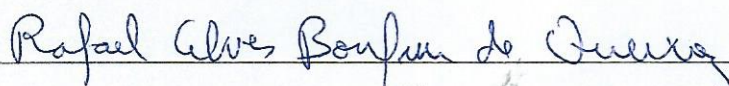
Prof^ª. Cecilia Toledo Hernández, D.Sc. / MCCT-UFF



Prof. Gustavo Benitez Alvarez, D.Sc. / MCCT-UFF



Prof^ª. Kelly Alonzo Costa, D.Sc. / VEP-UFF



Prof. Rafael Alves Bonfim de Queiroz, D.Sc. / ICE-UFJF

Volta Redonda, 15 de agosto de 2018.

*"A ciência é, portanto, uma perversão de si mesma, a menos que
tenha como fim último, melhorar a humanidade."*

Nikola Tesla

Dedicatoria.

Dedico este trabalho à minha mãe Elizabeth, que teria
muito orgulho em me ver aqui.

Agradecimentos

Agradeço ao Criador que me deu a vida e a capacidade de aprender.

Agradeço aos familiares e amigos que sem o apoio não seria possível percorrer este caminho.

Agradeço ao programa de Pós Graduação MCCT/UFF pela oportunidade a mim cedida, e aos Professores Wellington Gomes Dantas, Cleyton Senior Stampa, Diomar César Lobão, Gustavo Benitez Alvarez, Tiago Araújo Neves, Yoisell Rodríguez Núñez, Panters Rodríguez Bermúdez e Eliane da Silva Christo que contribuíram diretamente para minha formação.

Agradeço aos membros da banca por aceitarem o convite para avaliar este trabalho, em especial aos Professores e Orientadores Eliane da Silva Christo e Aryfrance Rocha Almeida, pelo interesse e boa vontade demonstrados durante o desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço à CAPES e ao PROGRAD/UFF pelo suporte financeiro através da bolsa de Mestrado e de Tutoria.

Resumo

Um sistema elétrico de potência (SEP) está sujeito a constantes adversidades devido a sua complexidade, sensibilidade e dimensões físicas. Em destaque especial têm-se as linhas de transmissão (LTs) que são os elementos mais vulneráveis. Apesar de existir todo um aparato tecnológico com o objetivo de proteger as LTs, estas são inevitavelmente alvos de descargas elétricas atmosféricas e curtos circuitos que geram distorções no sinal de tensão e de corrente transportados. Apesar de grande parte das ocorrências destas distorções nos sinais não serem prejudiciais ao fornecimento de energia é importante ter-se o controle destas ocorrências, pois isso possibilita a classificação do tipo de falta e sua localização geométrica na linha de transmissão. O controle estatístico das faltas permite, por exemplo, a verificação da vida útil de isoladores, ou aferição da qualidade de para-raios de linha em determinados trechos onde as ocorrências de descargas atmosféricas sejam maiores. Já em situações onde o distúrbio gerado pela falta seja grande o suficiente para prejudicar seu funcionamento, causando o desligamento de disjuntores, é possível agilizar a ação de equipes técnicas de reparos, através da informação prévia do tipo de curto-circuito e sua localização. O número de pesquisas e de novas técnicas desenvolvidas com intuito de garantir qualidade e interruptividade do sistema elétrico é grande devido à importância destes parâmetros tanto para os consumidores quanto para as concessionárias de energia. As multas taxadas às empresas responsáveis pelo transporte de energia pelos órgãos governamentais por descumprimento das normas são elevadas, e com isso atender a estas exigências de qualidade é prioridade das concessionárias. São inúmeras as técnicas de classificação e localização de faltas, que variam desde a simples avaliação dos sinais de tensão e corrente em frequência fundamental, a abordagens que utilizam redes neurais artificiais. Há também estudos bem sucedidos que utilizam análise em alta frequência dos sinais transitórios gerados pelos distúrbios, que se valem da teoria das ondas viajantes (*TOV*) que rege o comportamento destes sinais. Esta técnica é aliada a métodos como: transformada wavelet, transformada de Stockwell, análise de componentes principais e análise de componentes independentes. No presente trabalho é proposto um método baseado na análise de periodicidade de funções de autocorrelação dos sinais transitórios. Através da função de autocorrelação, é possível constatar um padrão específico proporcional à distância da falta para cada situação de falta. Os resultados comprovaram sua eficiência quando comparados a outros métodos, como por exemplo o *TOV*.

Abstract

An electrical power system (EPS) is subject to constant adversities due to its complexity, sensitivity and physical dimensions. Special emphasis is given to transmission lines (LTs) that are the most vulnerable elements. Although there is a whole technological apparatus with the purpose of protecting the LTs, they are inevitably targets of atmospheric electrical discharges and short circuits that generate distortions in the transported voltage and current signal. Although most of the occurrences of these signal distortions are not detrimental to the energy supply, it is important to have control of these occurrences, as this allows the classification of the fault type and its geometric location in the transmission line. Statistical control of faults allows, for example, the verification of the life of insulators, or benchmarking quality in certain sections where the occurrences of atmospheric discharges are greater. Already in situations where the fault generated by the fault is large enough to impair its operation, causing the disconnection of circuit breakers, it is possible to expedite the action of technical repair teams, through prior information of the type of short circuit and its location. The number of researches and new techniques developed with the purpose of guaranteeing quality and interruptivity of the electrical system is great due to the importance of these parameters for both the consumers and the concessionaires of energy. The fines imposed on companies responsible for transporting energy by government agencies for non-compliance with the rules are high, and thus meeting these quality requirements is a priority of the concessionaires. Numerous fault classification and localization techniques range from the simple evaluation of voltage and current signals to fundamental frequency, to approaches that use artificial neural networks. There are also successful studies that use high-frequency analysis of transient signals generated by disturbances, which rely on the theory of traveling waves (*TOV*) that governs the behavior of these signals. This technique is allied to methods such as: wavelet transform, Stockwell transform, principal component analysis and independent component analysis. In the present work, a method based on the analysis of periodicity in autocorrelation functions of the transient signals is proposed. Through the analysis of the autocorrelation function, it is possible to verify a specific pattern proportional to the distance of the fault for each fault situation. The results proved their efficiency when compared to other methods, such as *TOV*.

Palavras-chave

1. Localização de Faltas
2. Linhas de Transmissão
3. Séries Temporais
4. Função de Autocorrelação
5. Ondas Viajantes

Glossário

AIC	: <i>Akaike Information Criterion</i>
AIC _c	: <i>Akaike Information Criterion - correction</i>
ACI	: Análise de Componentes Independentes
ACP	: Análise de Componentes Principais
AF	: Análise de Fourier
ANEEL	: Agência Nacional de Energia Elétrica
AR	: auto regressivo
ARIMA	: auto regressivo, integrado com médias móveis
ARMA	: auto regressivo com médias móveis
ATP	: <i>Alternative Transients Program</i>
BIC	: <i>Bayesian Information Criterion</i>
CA	: Corrente alternada
CC	: Corrente contínua
CEPEL	: Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
DEC	: Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
fac	: função de auto correlação
facp	: função de auto correlação parcial
FEC	: Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
Hz	: Hertz
LT	: Linha de Transmissão
MA	: médias móveis
MME	: Ministério de Minas e Energia
MMQ	: Método dos Mínimos Quadrados
ONS	: Operador Nacional do Sistema
RNA	: redes neurais artificiais
SARIMA	: sazonal, auto regressivo, integrado com médias móveis
SEP	: Sistema Elétrico de Potência
SI	: Sistema internacional de Medidas
SIN	: Sistema Interligado Nacional

SINDAT	:	Sistema de informações geográficas cadastrais do SIN
ST	:	Séries Temporais
TOV	:	Teoria das Ondas Viajantes
TS	:	Transformada de Stockwel
TWD	:	Transformada Wavelet Discreta

Sumário

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xvi
Lista de Símbolos	xvii
1 Introdução	20
1.1 Contextualização	20
1.2 Motivação	21
1.3 Objetivos	22
1.3.1 Objetivo Geral	22
1.3.2 Objetivos Específicos	22
1.4 Estrutura do texto	22
2 Referencial Bibliográfico	24
2.1 Técnicas baseadas em análise em frequência fundamental	25
2.2 Técnicas baseadas em análise em alta frequência	27
2.3 Técnicas baseadas em inteligência computacional	32
3 Sistema de Transmissão de Energia Elétrica	35
3.1 Modelos de Linha de Transmissão	37
3.1.1 Parâmetros das Linhas de Transmissão	38
3.1.2 Modelo de linhas curtas	39
3.1.3 Modelo PI (π)	40

3.1.4	Modelo de Parâmetros Distribuídos	41
3.1.5	Modelo JMARTI	43
3.2	Falhas e Proteção em Linhas de Transmissão	48
4	Fundamentação Teórica	55
4.1	Técnicas de Processamento de Sinais	55
4.1.1	Mínimos Quadrados	57
4.1.2	Transformada de Fourier	58
4.1.3	Transformada Wavelet	58
4.2	Análise de Séries Temporais	59
4.2.1	Parâmetros Estatísticos	59
4.2.2	Modelos de Séries Temporais	62
4.2.3	Formas de Identificação de Modelos	65
	4.2.3.1 Análise da <i>fac</i> e <i>facp</i>	65
	4.2.3.2 Critérios de Informação	65
4.2.4	Decomposição de séries temporais	67
4.3	Ondas Viajantes	71
5	Metodologia	77
5.1	Simulação dos dados	77
5.2	Tratamento dos Dados	81
5.3	Comparação dos resultados	88
6	Resultados	90
6.1	Linha 1 - $100kHz$	91
6.2	Linha 1 - $200kHz$	97
6.3	Linha 2 - $200kHz$	100
6.4	Comparações entre técnicas diversas	103

7	Conclusões e Trabalhos Futuros	104
7.1	Conclusões	104
7.2	Sugestões para trabalhos futuros	106
7.3	Contribuições	106
	Referências	107

Lista de Figuras

3.1	<i>SIN</i> , com destaque para os comprimentos das linhas de transmissão referentes ao ano de 2017. Fonte: (SINDAT..., 2017).	36
3.2	Esquema interno de um gerador trifásico e gráficos das tensões de saída. Fonte: Adaptado de (KOSOW, 1985).	38
3.3	Modelo de linha curta. Fonte: Adaptado de (ZANETTA, 2003).	40
3.4	Distribuição dos parâmetros no modelo <i>PI</i> . Fonte: Adaptado de (ZANETTA, 2003).	40
3.5	Modelo de parâmetros distribuídos. Fonte: Adaptado de (ZANETTA, 2003).	41
3.6	Interpretação física da função $a_1(t)$ para o modelo JMARTI. Fonte: (MARTI, 1982).	44
3.7	Interpretação física da função $a_1(t)$ para o modelo JMARTI (MARTI, 1982). A função $a_2(t)$ é utilizada nos modelos anteriores ao JMARTI. Fonte: (MARTI, 1982).	46
3.8	Novo modelo de linha para frequência dependente para os nodos k e m . Fonte: (MARTI, 1982).	46
3.9	Modelo para associação de resistores e capacitores. Fonte: (MARTI, 1982).	47
3.10	Falta trifásica. Fonte: Adaptado de (SOUZA; CHRISTO; ALMEIDA, 2017c).	49
3.11	Falta bifásica aterrada. Fonte: Adaptado de (SOUZA; CHRISTO; ALMEIDA, 2017c).	50
3.12	Falta bifásica sem componente terra. Fonte: Adaptado de (SOUZA; CHRISTO; ALMEIDA, 2017c).	50
3.13	Falta monofásica. Fonte: Adaptado de (SOUZA; CHRISTO; ALMEIDA, 2017c).	50

3.14	Percentuais de ocorrências das possíveis situações de faltas nas linhas de transmissão trifásicas. Fonte: Baseado em (PAITHANKAR; BHIDE, 2010).	51
3.15	Processo de envelhecimento em isoladores poliméricos. Adaptado de (BEZERRA et al., 2010).	52
3.16	Representação simplificada das partes de um relé de proteção à distância. Adaptado de (AGUILAR; PÉREZ; ORDUÑA, 2011).	54
4.1	Etapas de um sistema de análise de sinais de oscilografia. Fonte: (MORETO; ROLIM, 2010).	56
4.2	Esquema de funcionamento da função de autocorrelação sucessiva. Fonte: Autoria própria.	61
4.3	Comparação gráfica entre as fac de ordens 1 a 4. Fonte: Autoria própria.	62
4.4	Série temporal decomposta em tendência, sazonalidade e ruído. Fonte: Adaptado de (FERREIRA(Org), 2018).	69
4.5	Comportamento da função sazonal para várias opções do operador sazonal geral autorregressivo. Fonte: Adaptado de (BOX; JENKINS; REINSEL, 2008).	71
4.6	Modelo de linha de transmissão de parâmetros distribuídos considerando um ponto de curto-circuito. Fonte: (ALMEIDA, 2017 apud ZANETTA, 2003).	72
4.7	Ondas progressivas e regressivas. Fonte: (ALVES, 2015).	74
4.8	Diagrama de Lattice para o circuito analisado. Fonte: Adaptado de (ALMEIDA, 2017).	75
5.1	Diagrama unifilar das LTs implementas. Fonte: (ALMEIDA, 2017).	77
5.2	Diagrama unifilar das LTs implementadas. Fonte: Autoria própria.	78
5.3	Topologia da torre utilizada (Linha 1). Fonte: (ALVES, 2015).	79
5.4	Série temporal e sua tendência. Fonte: Autoria própria.	81
5.5	Sinal de tensão desacoplado. Fonte: Autoria própria.	83
5.6	(a) Gráfico da $fac^{(4)}$ com 220 $lags$ referente ao gráfico mostrado na Figura 5.5. (b) Destaque para o primeiro ciclo. Fonte: Autoria própria.	85

5.7	Fluxograma da metodologia utilizada para localização de faltas. Fonte: Autoria própria.	87
5.8	Fluxograma de (SOUZA; CHRISTO; ALMEIDA, 2017c).	88
5.9	Fluxograma de (ALMEIDA, 2017).	89
6.1	Curva de ajuste obtida por meio de MMQ para os valores médios de distâncias.	91
6.2	Comparação entre as distâncias médias reais e calculadas para resultados mostrados nas Tabelas 6.1 a 6.4.	96
6.3	Comparação entre os erros absolutos das distâncias médias reais e calculadas para resultados mostrados nas Tabelas 6.2 a 6.5.	96
6.4	Curva de ajuste obtida por meio de MMQ para os valores médios de distâncias. Frequência de $200kHz$	97
6.5	Comparação entre as distâncias médias reais e calculadas para resultados mostrados na Tabela 6.5.	99
6.6	Comparação entre os erros absolutos das distâncias médias reais e calculadas para resultados mostrados na Tabela 6.5.	100
6.7	Curva de ajuste obtida por meio de MMQ para os valores médios de distâncias.	102
6.8	Comparação entre os erros relativos percentuais entre o método proposto e (ALMEIDA, 2017).	102

Lista de Tabelas

3.1	Percentual de faltas por equipamentos no <i>SEP</i>	51
4.1	Comportamento Teórico dos modelos $AR(p)$, $MA(q)$, $ARMA(p, q)$, $SAR(P)$, $SMA(Q)$ e $SARMA(P, Q)$	66
5.1	Medidas relacionadas aos condutores fase e para-raios utilizados.	78
5.2	Configurações das simulações realizadas.	80
6.1	Falta Bifásica $\hat{A} - \hat{B}$. Linha 1 a $100kHz$. Distâncias das faltas simuladas de $5km$ a $25km$ com incremento de $5km$	92
6.2	Falta Bifásica $\hat{A} - \hat{B}$. Linha 1 a $100kHz$. Distâncias das faltas simuladas de $30km$ a $70km$ com incremento de $10km$	93
6.3	Falta Bifásica $\hat{A} - \hat{B}$. Linha 1 a $100kHz$. Distâncias das faltas simuladas de $80km$ a $140km$ com incremento de $10km$	94
6.4	Falta Bifásica $\hat{A} - \hat{B}$. Linha 1 a $100kHz$. Distâncias das faltas simuladas de $160km$, $180km$ e $190km$	95
6.5	Falta bifásica $\hat{A} - \hat{B}$, Linha 1 a $200kHz$. Distâncias das faltas simuladas de $5km$ a $4km$	98
6.6	Falta bifásica $\hat{A} - \hat{B}$, Linha 1 a $200kHz$. Distância das faltas simuladas de $155km$	99
6.7	Falta bifásica $\hat{A} - \hat{B}$, Banco de dados (ALMEIDA, 2017).	101
6.8	Comparação entre erros relativos médios para situações de faltas bifásicas.	103

Lista de Símbolos

\hat{A}	: Fase com ângulo zero
a	: ST ruído branco
B	: operador de retrocesso
\hat{B}	: Fase com ângulo $\frac{2\pi}{3}$
C ou c	: capacitância
C'	: capacitância por unidade de comprimento
\hat{C}	: Fase com ângulo $\frac{4\pi}{3}$
D	: número de diferenças realizadas na componente sazonal
d	: número de diferenças realizadas na ST
$E[]$: valor probabilisticamente esperado
e	: número de Euler
F	: ST pós falta
f	: frequência
G ou g	: condutância
G'	: condutância por unidade de comprimento
H_0	: hipótese nula para Teste de <i>Cox-Stuart</i>
H_1	: hipótese alternativa para Teste de <i>Cox-Stuart</i>
I_R	: tensão na carga
I_S	: corrente na fonte
j	: unidade imaginária
k	: índices da <i>fac</i> e <i>facp</i>
L ou l	: indutância
L'	: indutância por unidade de comprimento
l	: posição de início do distúrbio no vetor de tensão
P	: ordem do polinômio autorregressivo da componente sazonal
$P_{(n \times n)}$: matriz composta pelas auto correlações
p	: ordem do polinômio autorregressivo $AR(p)$
$P(ST)$: número de termos na ST

Q	: ordem do polinômio de médias móveis da componente sazonal
q	: ordem do polinômio de médias móveis $MA(q)$
R ou r	: resistência
R'	: resistência por unidade de comprimento
S	: sazonalidade
S_t	: componente sazonal da ST
\hat{S}_t	: componente sazonal ajustada
T	: terra
T_t	: componente tendenciosa da ST
\hat{T}_t	: componente tendenciosa ajustada
t	: tempo normalizado
\hat{t}	: tempo
V	: Volt
V_R	: tensão na carga
V_S	: tensão na fonte
v	: velocidade de propagação da onda no meio
X	: ST
X_C	: reatância capacitiva
X_L	: reatância indutiva
\bar{X}	: ST com média zero
X_t^{Saz}	: ST livre de sazonalidade
X_t^{Tend}	: ST livre de tendência
X^*	: ST para Teste de <i>Cox-Stuart</i>
x_t	: termos da ST
Z	: impedância
Z_0	: impedância característica
Z_f	: impedância de falta
α	: constante de atenuação de onda
β	: constante de fase de onda
γ_k	: constante de propagação de onda
η	: função de auto covariância
Δ	: operador de diferenciação
δz	: unidade de comprimento da LT

δv	: incremento de tensão no trecho δz
δi	: incremento de corrente no trecho δz
$\Theta(B)$: polinômio de médias móveis
$\Theta(B^S)$: polinômio de médias móveis sazonal
θ	: coeficientes do polinômio de médias móveis
π	: razão entre circunferência e diâmetro de um círculo
μ	: média aritmética da ST
ν	: ângulo de incidência do distúrbio no sinal senoidal
ξ	: ST pré falta
ρ_k	: função de auto correlação
$\hat{\sigma}_x^2$: variância
$1 - \varsigma$: percentual relacionado ao intervalo de confiança IC
Υ	: autocorrelação parcial
$\Phi(B)$: polinômio autorregressivo
$\Phi(B^S)$: polinômio autorregressivo sazonal
ϕ	: coeficientes do polinômio autorregressivo
φ_n	: ângulo de defasagem entre as fases da LT
ω	: frequência angular
$\frac{\partial i}{\partial t}$: derivada parcial de $i(t)$ em relação a t
$\frac{\partial v}{\partial t}$: derivada parcial de $v(t)$ em relação a t
Saz	: sazonalidade
$Tend$: tendência
-1	: matriz inversa
Υ_k	: função de auto correlação parcial

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

O consumo de energia é um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico e do nível de qualidade de vida de qualquer sociedade. Ele reflete tanto o ritmo de atividade dos setores industrial, comercial e de serviços, quanto a capacidade da população para adquirir bens e serviços tecnologicamente mais avançados, como automóveis (que demandam combustíveis), eletrodomésticos e eletroeletrônicos (que exigem acesso à rede elétrica e pressionam o consumo de energia elétrica) (ANEEL, 2008).

No sistema elétrico, as falhas podem ocorrer nos diversos componentes, dentre os quais destacam-se as LTs como os elementos mais susceptíveis à falhas, especialmente se considerarmos suas dimensões físicas, quantidade, complexidade funcional e o ambiente em que se encontram, apresentando assim, maior dificuldade para manutenção e monitoramento (ALMEIDA et al., 2014). Dentre os principais causadores de falhas destacam-se principalmente as descargas atmosféricas (VISACRO, 2005).

Com a importância de se ter um sistema elétrico onde a continuidade, conformidade, flexibilidade e manutenibilidade sejam observados e garantidos, vêm-se buscando o aperfeiçoamento e inovação de técnicas empregadas em equipamentos de proteção e supervisão do sistema, proporcionando também a expansão do setor elétrico mantendo a qualidade de operação do sistema (FORMIGA, 2012). O desenvolvimento e aperfeiçoamento de algoritmos que possibilitem a análise e diagnóstico de falhas em sistemas elétricos de potência tem importante impacto econômico tanto para as concessionárias de energia quanto para os consumidores. Sistemas inteligentes, autônomos e online vêm sendo desenvolvidos e aplicados de forma significativa para lidar com esse tipo de problema.

As tecnologias de ponta hoje disponíveis incluem processamento digital de sinais de oscilografia, bancos de dados, interface gráfica, localização de faltas, simulação dinâmica de equipamentos de proteção, sistemas inteligentes de análise automática de oscilogramas e redes de oscilografia. Este aparato tecnológico possibilita um diagnóstico rápido e preciso com a mínima intervenção humana (CEPEL..., 2017).

1.2 Motivação

A localização precisa de faltas auxilia o setor de operação do sistema elétrico diminuindo o tempo de ocorrência do distúrbio e contribuindo para continuidade do fornecimento de energia elétrica (COSTA; SOUZA; BRITO, 2012). O desenvolvimento de novos métodos de localização digital de faltas em linhas de transmissão utilizando dispositivos baseados em microprocessadores é questão de interesse de pesquisadores e engenheiros de potência. Nos últimos anos, com um número muito grande de propostas tanto para novos métodos quanto para aperfeiçoamento de técnicas localização de faltas já existentes, visando melhorar a precisão das localizações de faltas em linhas de transmissão (ALMEIDA, 2007). Todavia, a grande maioria dos estudos voltados para localização de faltas em *LTs* se baseia na análise de componentes principais, na análise de transitórios, com a teoria das ondas viajantes, no uso de redes neurais artificiais, ou na junção de alguns destes métodos.

A aplicação de modelos de séries temporais (*ST*) com a finalidade de extrair informações de distâncias de faltas é um campo ainda pouco explorado. Atualmente esses modelos de *ST* são utilizados no estudo de demanda em energia elétrica. Aplica-se também modelos de *STs* no estudo de fluxo de redes de computadores, tanto para a análise de preferência de certo assunto por determinado grupo de pessoas, quanto para a proteção de um servidor de *Internet* buscando determinar se uma ação na rede parte de um usuário ou de vírus de computador instalado nessa rede. Silva (2015) mostra em seu estudo a aplicabilidade das *STs* na análise de fluxo de rede de computadores. Visto a enorme semelhança entre o comportamento dos dados de fluxo de rede e o comportamento dos dados tratados no presente trabalho, iniciou-se a tentativa de utilizar modelos de *STs* na abordagem desse problema.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é propor um método que possibilite a localização de faltas em linhas de transmissão aéreas. O método proposto é baseado na análise de séries temporais. O modelo consiste em verificar e analisar tendências e periodicidades presentes nos sinais de tensão analisados.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para o desenvolvimento do objetivo geral é necessário o estudo dos objetivos específicos citados a seguir:

- Gerar dados de faltas em linhas de transmissão aéreas simuladas através do *software* livre *ATPDraw*®¹;
- Analisar os perfis das séries temporais através do *software* livre *R*®²;
- Desacoplar os sinais transitórios gerados pela falta da senoide da linha de transmissão;
- Utilizar análise das funções de auto correlação (*fac*) para filtrar os dados analisados, e a partir desta função estimar o valor da sazonalidade;
- Obter um polinômio, através do método de mínimos quadrados (*MMQ*), que relacione os valores de sazonalidade dos dados com as distâncias de faltas geradoras destas faltas;
- Comparar as distâncias obtidas com uso direto da teoria das ondas viajantes e análise de componentes independentes, com os resultados obtidos através do método proposto.

1.4 Estrutura do texto

O presente trabalho está estruturado em sete capítulos, assim descritos:

¹Alternative Transient Program - Windows Version 6.2 - CopyRight 1994-2015

²Version 3.4.0 – CopyRight 2009-2016 RStudio, Inc.

- Capítulo 1 - apresenta o tema abordado, o referente problema, as justificativas que sustentam a necessidade desta pesquisa e sua contribuição para a literatura do referido assunto;
- Capítulo 2 - apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre o surgimento e aperfeiçoamento das técnicas de localização de faltas;
- Capítulo 3 - apresenta conceitos básicos para compreensão de eletricidade, abordando o sistema elétrico trifásico com enfoque às linhas de transmissão de energia aéreas através da apresentação de seus principais modelos. Mostra ainda conceitos básicos necessários à compreensão dos tipos de falhas e os sistemas de proteção utilizados, sendo esses a aplicação real do método proposto;
- Capítulo 4 - apresenta métodos de extração de dados oscilográficos e suas ferramentas matemáticas. Traz os conceitos básicos necessários à compreensão de séries temporais, bem como os principais modelos de séries temporais. Apresenta também a teoria das ondas viajantes, sendo essa utilizada para validação dos resultados obtidos com os modelos de séries temporais;
- Capítulo 5 - apresenta a forma como os métodos de extração de dados e os modelos de séries temporais, apresentados no Capítulo 4, são utilizados.
- Capítulo 6 - apresenta os resultados obtidos com o método aqui proposto e comparações de desempenhos com o uso da teoria das ondas viajantes. Traz ainda uma breve exposição dos *software* utilizados ao longo desta pesquisa;
- Capítulo 7 - apresenta as conclusões e discussões bem como sugestões para futuras pesquisas no assunto.

Capítulo 2

Referencial Bibliográfico

Neste capítulo é apresentado um levantamento bibliográfico de alguns trabalhos que envolvem técnicas de localização de faltas. De acordo com a literatura existem três categorias para os princípios de localização de faltas em linhas de transmissão:

- princípio baseado em componentes de frequência fundamental;
- princípio baseado em componentes de alta frequência, que utilizam a Teoria das Ondas Viajantes (*TOV*);
- princípio baseado em inteligência computacional (redes neurais artificiais).

Há ainda outras duas classificações das técnicas de localização de faltas. Uma delas se refere ao número de terminais de monitoramento: os dados utilizados podem ser provenientes de apenas um terminal ou de multiterminais de monitoramento. A outra classificação se refere às condições de medição dos dados utilizados: dados de pré-falta, pós-falta ou medidas obtidas durante a falta.

Neste ponto é importante ressaltar que apesar da existência de todas estas classificações, um método proposto pode conter mais de uma destas características mencionadas. Uma pesquisa desenvolvida por Ferreira et al. (2016), onde é feito um levantamento de trabalhos dedicados à análise de faltas em linhas de transmissão de sistemas de potência, mostra um crescimento exponencial de pesquisas voltadas para esta área.

2.1 Técnicas baseadas em análise em frequência fundamental

As técnicas que utilizam dados em frequência fundamental são também chamadas de técnicas baseadas em impedância. Estes métodos são mais difundidos devido à maior simplicidade matemática e facilidade de programação. No que se refere ao tipo de tratamento de sinal utilizado, as técnicas de localização em componentes de frequência fundamental são subdivididas em:

- técnicas baseadas na Transformada de Fourier;
- técnicas baseadas em filtro de Kalman;
- técnicas baseadas no ajuste por mínimos quadrados.

A Transformada de Fourier, segundo sua própria definição, baseia-se nas transformadas ortogonais e no fato de que uma forma de onda é composta do somatório de uma componente principal e de termos harmônicos, sendo estes últimos compostos ainda por somatórios infinitos. Nessas técnicas a única parcela a ser considerada é a componente fundamental do sinal, portanto, o objetivo da aplicação do algoritmo é o de resgatar essa parcela dos sinais de entrada, atuando, assim, como um filtro digital (VALINS, 2005).

Em (TAKAGI et al., 1982a) é apresentado um algoritmo de localização para linhas de extra e ultra-alta tensão baseado no uso de sinais de tensão e corrente apenas de um terminal. Os sinais são filtrados através da Transformada de Fourier, com o objetivo de se obter uma medida dos fasores de tensão e corrente em regime estacionário.

Como continuidade dos estudos Takagi et al. (1982b) apresentam outra solução para localização de faltas utilizando Transformada de Laplace, seguido de Newton Rapson para a resolução da equação não linear proveniente desta transformada.

Apesar dos resultados obtidos por Takagi et al. (1982a) e Takagi et al. (1982b) serem satisfatórios, estes estudos desconsideram os efeitos de reatância na linha de transmissão ao considerar as impedâncias puramente resistivas. Esta consideração traz consigo erros em determinadas situações de faltas. Além disso, o modelo adotado para a linha de transmissão desconsidera os parâmetros distribuídos, fator que contribui ainda mais para tornar o método incapaz de satisfazer a maioria das situações de faltas.

Já mais recentemente, Horowitz e Phadke (2008) descrevem um algoritmo que utiliza Transformada de Fourier em relés de distâncias empregados em linhas de transmissão.

O tempo de resposta do algoritmo é satisfatório, sendo pouco inferior a $8,3ms$ após a ocorrência da falta.

Como continuidade dos estudos, Phadke e Thorp (2009) utilizam Transformada de Fourier para determinar as componentes simétricas de tensão e corrente de fase. A melhoria possibilita uma simplificação na programação dos módulos dos relés através do uso de uma única equação possível de ser utilizada em todos os módulos. Esta abordagem baseia-se na relação entre os sinais de tensão e corrente em condições de falta.

Com relação ao filtro de Kalman, este foi desenvolvido por Rudolf Emil Kalman em 1960 como solução do problema de filtragem linear discreto. Este filtro pode ser definido como um conjunto de equações matemáticas utilizados para estimar estados de um processo, com a minimização do erro médio quadrático (SILVA; LOPES; KUGA, 2006).

No trabalho de Girgis (1982) é apresentado um algoritmo que utiliza filtro de Kalman em dados de tensão e corrente em frequência fundamental para extração de ruídos destes sinais. Isso possibilita maior precisão no cálculo de impedância aparente vista pelo relé de monitoramento.

Também utilizando filtro de Kalman, Coury (1987 apud VALINS, 2005) realiza estimativas das componentes de frequência fundamental de tensão e corrente. E através destes valores ótimos estimados, é implementado um algoritmo para detecção, classificação, cálculo da impedância aparente e localização de uma falta no sistema elétrico analisado. Com base no filtro de Kalman, são construídos dois modelos para as fases: um modelo com falta e outro modelo sem falta. Nestes dois modelos propostos é então calculada a probabilidade das duas hipóteses, e apenas o modelo relacionado à situação verdadeira (falta ou não-falta) permanece na estimativa. Os resultados apresentados mostram que o método é altamente eficiente.

Em (SOLIMAN; EL-HAWARY, 1996) é utilizado filtro de Kalman para estimação de componentes simétricas em sistemas assimétricos. O estudo apresenta diversas situações, simuladas e reais, com variações de frequência de amostragem, tamanho de janela. Concluiu-se que o número de amostragens e suas frequências influenciam nos parâmetros estimados. O método é capaz de identificar harmônicos e estimar as componentes simétricas.

Já as técnicas que envolvem o uso de mínimos quadrados consistem em aproximar um conjunto de pontos ou de dados a uma função pré determinada de forma que se minimize

o quadrado dos erros cometidos nesta aproximação. Este método é utilizado em sistemas de potência para estimar parâmetros como módulo e fase da componente fundamental, bem como de harmônicas (SACHDEV; BARIBEAU, 1979).

Lin, Liu e Chen (2004) propõem uma técnica para controle de atuação de relés de monitoramento de falhas para *LTs* de alta tensão baseados em mínimos quadrados através do monitoramento de índices de detecção e de localização, sendo este último a fim de restringir a atuação do relé à sua área de proteção. Para distinguir a formação de arcos voltaicos e formação de falhas permanentes estima-se a amplitude da tensão de arco pelo método de mínimos quadrados através dos fasores harmônicos sincronizados e medidos. Sendo estes causados pela não linearidade do arco.

Por sua vez, Formiga (2012) também utiliza mínimos quadrados para controle de relés. A técnica utiliza mínimos quadrados recursivo (mínimos quadrados em caminhada aleatória) que conta ainda com a atuação de um filtro visando a eliminação de componentes de corrente contínua (*DC*) em decaimento presentes no sinal analisado. O método é aplicado a diversas situações de faltas simuladas no software *ATP*[®], com variações de valores de resistência, distância, ângulo e tipo de falta. Os resultados obtidos são satisfatórios quando comparados a outras técnicas de estimação de fasores baseadas tanto em mínimos quadrados quanto no algoritmo de Fourier de um ciclo.

2.2 Técnicas baseadas em análise em alta frequência

As técnicas que se valem da análise de dados em alta frequência se baseiam na Teoria das Ondas Viajantes. Esta teoria se sustenta no cálculo do tempo de deslocamento de uma onda transitória entre o ponto de falta e o terminal de monitoramento. Através da relação entre tempo de viagem e velocidade de propagação calcula-se o local da falta, e com isso qual relé de proteção deve agir, se necessário.

A Teoria das Ondas Viajantes é utilizada em conjunto com outras ferramentas matemáticas capazes de filtrar o sinal analisado, que em condições reais são bastante "contaminados" dependendo da frequência de amostragem. Só então após a filtragem é que se determina o tempo de propagação das ondas na linha de transmissão, e com a TOV calcula-se o local de ocorrência da falta.

A seguir é apresentado um histórico das técnicas que utilizam análise em alta frequência bem como as ferramentas utilizadas em conjunto com a Teoria das Ondas Viajantes.

- Transformada wavelet
- Transformada de Stockwell
- Análise de Componentes Principais
- Análise de Componentes Independentes

Os benefícios potenciais da aplicação da transformação wavelet para a análise de sinais transitórios em sistemas de energia foram reconhecidos nas últimas décadas. Em (SUNDARAVARADAN et al., 2014) é apresentado um histórico detalhado de trabalhos relevantes usando wavelets e redes neurais para a classificação e localização de faltas. Robertson et al. (1996) apresentam uma comparação da visão geral de Fourier, Fourier de tempo curto e Transformada Wavelet (TW). Apresentam também exemplos de aplicação de TW para analisar a potência transiente do sistema e extração de suas características.

Silveira, Seara e Zurn (2001) estudam a teoria das ondas viajantes auxiliada pela TW para desacoplamento de sinais de frequências diversas. Ressaltam a inviabilidade do método para faltas cujo ângulo de incidência seja próximo de zero, pois os sinais transitórios gerados pela falta se confundem a ruídos presentes na linha, e também para faltas muito próximas ao terminal de monitoramento, uma vez que existe uma margem de erro nos valores das distâncias calculadas.

Para identificação da metade faltosa da linha de transmissão, Fernandez e Rojas (2002) utilizam os picos da Transformada wavelet para situações com três terminais de monitoramento. Já Elhaffar e Lehtonen (2005), utilizam para um caso de monitoramento em dois terminais as polaridades dos coeficientes de transformada de wavelet.

Cordeiro et al. (2007) fazem uso da Transformada wavelet para monitorar a qualidade de energia por meio da análise de multirresolução. Nesta análise, o sinal distorcido é dividido em diferentes níveis, com frequências distintas. Com isto, os sinais decompostos fornecem a existência e localização temporal de um distúrbio. Seu algoritmo relata o tempo preliminar do distúrbio, tempo inicial e final, duração, amplitude e classificação do distúrbio.

Em seu trabalho, Costa, Souza e Brito (2009) utilizam a energia dos coeficientes de wavelet F em um ciclo após a inicialização da falha como ferramenta para a localização de falhas nas LTs . São realizadas análises de diferentes linhas com diferentes características, e os resultados obtidos se mostram insatisfatórios somente em três situações. Para caracterização das falhas em resistência de curto-circuito, ângulo de incidência e localização

são realizadas centenas de simulações computacionais, e dos resultados obtidos somente dezenove se mostram insatisfatórios.

O método multiterminais apresentado por Ngu e Ramar (2011) combina a simplicidade do método baseado em impedância com a precisão do método baseado em Transformada de Wavelet. Um método baseado em impedância simplificado é usado para identificar a seção de linha com falha. Na análise da Transformação de Wavelet Discreta (*DWT*) do sinal de corrente é obtida a informação de tempo das *TWs* incidentes e refletidas. A localização precisa da falha é então determinada usando essas informações de tempo. O algoritmo proposto é testado simulando linhas de quatro e cinco terminais sob diferentes condições de falha, tais como vários ângulos de inicialização de falha, distâncias de falha e resistências de falha. O modelo de linha de parâmetro distribuído constante (modelo Clarke) é usado para simulação.

Souza, Christo e Almeida (2017c) mostram uma técnica que combina Transformada Wavelet e análise de séries temporais através de modelos *SARIMA*. O método proposto consiste em utilizar a transformada para desacoplamento dos sinais de distúrbio gerado pela falta e utilizar o sinal resultante como uma série temporal. Os modelos são escolhidos conforme os valores do *critério de avaliação de Akaike corrigido (AICc)* calculados para cada possível modelo. Aquele que apresenta o menor valor de *AICc* é o modelo considerado para aquela determinada situação de falta. Com isso, uma série temporal é recriada a partir do modelo escolhido como melhor, e então utiliza-se a teoria das ondas viajantes para a estimativa da distância de ocorrência da falta. Os resultados são comparados a outros obtidos através de redes neurais, componentes independentes e transformada de Stockwell. Em algumas situações, dependentes das condições da falta, os resultados obtidos com o método proposto se mostram melhores apresentando menor erro relativo. O método é insensível à resistência de falta, o que é um ponto positivo, porém é altamente dependente do ângulo de incidência da falta.

Com relação à Transformada de Stockwell (*TS*), esta é uma poderosa ferramenta que pode ser utilizada na análise de sinais não-estacionários, retornando informações características no domínio da frequência e do tempo. Desta forma, esta técnica pode ser vista como uma extensão da Transformada Wavelet Contínua (*TWC*) podendo ser expandida, também, para o domínio discreto (SOUZA, 2015).

Em Souza et al. (2015) e Souza (2015) é apresentado um método automático de localização de faltas em linhas de transmissão baseado na Teoria das Ondas Viajantes utilizando a Transformada de Stockwell para observação dos tempos de propagação das

ondas viajantes e da frequência dominante dos sinais transitórios gerados pelas situações de falta utilizando dados provenientes de apenas um terminal de linha. Tal método é imune a mudanças de resistência de falta e ângulo de incidência apresentando erros bastante reduzidos. Na tentativa de melhoria da precisão da estimação da localização das faltas é projetada uma RNA do tipo *Multi-Layer Perceptron*, treinada a partir de características dos sinais faltosos extraídas através da Transformada de Stockwell, o que torna o método ainda mais preciso.

No trabalho de He et al. (2015) a Transformada de Stockwell é adotada para extrair a frequência desejada das ondas viajantes a partir dos sinais de pós-falha. Os sinais de tensão e corrente de ondas viajantes são divididos obtendo uma impedância aparente da linha durante a propagação das ondas. Com isso determina-se, com uso de relés, a direção de ocorrência da falha.

Em (VÁZQUEZ-MARTÍNEZ, 2003) é apresentada uma nova abordagem para a proteção de distância com ondas viajantes, com base no reconhecimento de padrões com análise de componentes principais (*ACP*), para ser usado para proteção de *LT* com resposta rápida. A abordagem proposta explora a possibilidade de caracterizar a forma da frente de onda para falhas internas e externas da linha de transmissão protegida. Neste caso, uma *ACP* com redes neurais é proposta como extrator de recursos para implementar o processo de reconhecimento de padrões. A abordagem foi comprovada com amostras de corrente e tensão de um sistema de energia trifásico de $230kV$, que foi simulado usando os transientes eletromagnéticos no programa *ATP-EMTPDC*[®]. Os resultados mostram a viabilidade de implementar um algoritmo para proteção de ultra alta tensão de linha de transmissão.

Vázquez et al. (2007) utilizam (*ACP*) em sistemas de proteção de linha de transmissão para descrever os padrões de falhas dados pelas ondas viajantes para discriminar faltas internas e externas.

Aguilar, Pérez e Orduña (2011) fazem um estudo não apenas da função direcional, mas também do reconhecimento do tipo de falha e as funções de localização são consideradas. A função direcional garante a seletividade do sistema de proteção e o reconhecimento de tipo de falha pode permitir que um encaminhamento automático e uma localização de falha bem-sucedidos aliviem as tarefas de manutenção. Sua pesquisa emprega a análise multivariada, baseada em componentes principais e o princípio de proteção denominado proteção transiente baseada, que considera todos os componentes de frequência de um sinal.

A análise de componentes independentes (*ACI*) é um método de análise exposto em (HÉRAULT; JUTTEN; ANS, 1985; JUTTEN, 1988; JUTTEN; HERAULT, 1991). Segundo Almeida et al. (2014), é uma extensão da *ACP* que vem sendo estudada no contexto de separação cega de fonte (*BBS*) de suas misturas lineares, usando independência estatística como critério de separação fontes sem o conhecimento dos coeficientes de mistura, nem a provável distribuição das fontes do sinal.

Ao contrário dos convencionais métodos de eliminação de ruído, o método de *ACI* remove artefatos que são relacionados não apenas especificamente com a frequência, mas com origens diferentes. A *ACI* é hábil para separar estatisticamente fontes de um grupo de combinações lineares ou não lineares, sem fazer suposições sobre o processo de mistura, requerendo nenhuma informação sobre as fontes dos sinais, para assim separá-las, bastando apenas que sejam fontes independentes (Mak et al., 2010).

Os atuais algoritmos de *ACI* podem ser divididos em duas categorias. Os algoritmos da primeira categoria baseiam-se em computação *batch* minimizando ou maximizando alguns relevantes critérios de funções. O problema com estes algoritmos é que eles requerem operações matriciais complexas (COMON, 1994).

A segunda categoria inclui algoritmos adaptativos frequentemente baseados no método do gradiente estocástico, cuja estrutura destes algoritmos pode ser alterada ou ajustada de tal forma que o comportamento ou desempenho satisfaça algum critério desejado, podendo ser treinados para executar uma filtragem específica e tomar decisões.

Em seu trabalho, Almeida (2007) mostra um método alternativo baseado na utilização de *ACI* para localizar as distâncias de faltas diversas em um sistema de transmissão de $500kV$, a partir de diferentes ângulos de incidência de falta, em diferentes distâncias ao longo da linha de transmissão. São também introduzidos aos sinais das faltas outras perturbações não correlacionadas com o sinal principal.

Almeida (2017) propõe combinações de métodos que utilizam a *ACI*, a *TOV* e Máquina de Vetores de Suporte (*MVS*) em abordagens eficientes para a extração de características dos sinais transitórios de falta utilizadas em uma linha de alta tensão de $500kV$. A utilização destes métodos aplicados a um modelo real de linha de transmissão tem comprovado que os métodos propostos, de forma combinada, resultam em desempenho superior na localização e classificação de faltas. Os erros obtidos são inferiores a 1% para a localização com acurácia de 100% para a classificação de faltas com ruído. O desempenho da abordagem proposta tem apresentado melhores resultados quando comparados às principais técnicas convencionais, assim quando comparados às técnicas que utilizam

Redes Neurais Artificiais e outras técnicas de inteligência computacional.

2.3 Técnicas baseadas em inteligência computacional

De acordo com a pesquisa realizada por Bouthiba (2004), as redes neurais artificiais (*RNA*) passaram a ser usadas recentemente para a localização de faltas e ganharam importância significativa. O uso amplo das redes neurais começou no final dos anos oitenta e no início dos anos noventa. As redes neurais são geralmente usadas para obter maior eficiência na detecção, classificação e localização de falhas.

Dalstein e Kulicke (1995) usam redes neurais para a detecção de falhas em linhas de transmissão e também para distinção entre situações onde distúrbios são ou não gerados por formação de arco voltaico.

Em seu artigo, Kezunovic, Rikalo e Sobajic (1996) aplicam RNA para a classificação de falhas tanto para aplicações em tempo real quanto para aplicações *off-line*. Uma rede neural de aprendizagem supervisionada do mesmo tipo é utilizada para ambas as aplicações. O método proposto demonstrou-se que as redes neurais atingem o desempenho e benefício em ambas as situações.

Thukaram, Khincha e Vijaynarasimha (2005) apresentam uma abordagem de RNA e suporte de máquina vetorial (SVM) para localizar falhas em sistemas de distribuição radial. Diferente dos métodos tradicionais de estimativa da seção de falhas, a abordagem proposta usa medidas disponíveis nos estados de subestação, disjuntor e retransmissão. Os dados são analisados utilizando a técnica de componentes principais *ACP* e as falhas são classificadas de acordo com as reatâncias de seu caminho usando uma combinação de classificadores de vetores de suporte (SVCs) e redes neurais *feedforward*. Situações práticas em sistemas de distribuição, tais como dispositivos de proteção colocados apenas na subestação, todos os tipos de falhas e uma ampla gama de níveis de curto-circuito variáveis, são considerados para estudos. Os resultados demonstram a viabilidade de aplicar o método proposto no diagnóstico prático de falhas do sistema de distribuição.

Sedighi, Haghifam e Malik (2005) apresentam dois métodos, um baseado em algoritmo genético e um baseado em redes neurais, são propostos para detecção de falha de alta impedância em sistemas de distribuição. Esses métodos são usados para discriminar tais falhas da corrente de fuga do isolador e transientes, tais como comutação de capacitores, comutação de carga (alta / baixa tensão), falha à terra, corrente de entrada e troca de linha sem carga. A *TW* é usada para a decomposição de sinais e extração de recursos em

ambos os métodos. Em um método, GA é usado para redução de vetor de características e Bayes para classificação. No outro método, a *ACP* é aplicada para redução de vetor de recursos e as redes neurais são usadas para classificação.

Em (RAYBOLT, 2011) são avaliados dados de dois terminais para linhas de transmissão em circuito duplo utilizando redes neurais artificiais. São levantados os fatores que levam outros algoritmos a erros neste tipo de linha. Os testes realizados mostram um sistema eficiente para localização de defeitos em linhas de transmissão, comprovando a aplicação de redes neurais neste tipo de problema.

Ayyagari (2011) realiza a detecção, a classificação e a localização da falhas utilizando RNA. As redes *feedforward* são empregadas juntamente com o algoritmo de *backpropagation* para cada uma das três fases no processo de localização de falhas. A análise em redes neurais com número variável de camadas ocultas e neurônios por camada oculta é fornecida para validar a escolha das redes neurais em cada etapa. São fornecidos resultados de simulação para demonstrar que os métodos baseados na rede neural artificial são eficientes na localização de falhas nas linhas de transmissão e conseguem desempenhos satisfatórios.

Em (GASPAR et al., 2015) é apresentada uma nova forma de se abordar tanto a classificação como a localização de falhas em linhas de transmissão de energia em circuitos duplos. O diagnóstico de falhas é conseguido usando um algoritmo baseado em uma abordagem geométrica para construir um conjunto de redes neurais artificiais (*RNA*). Os parâmetros de entrada são as magnitudes das tensões de fase e as correntes medidas em apenas uma extremidade de uma linha de transmissão alimentada por duas extremidades. A técnica proposta é capaz de gerar a topologia e o peso para cada neurônio sem especificar os parâmetros de redes iniciais. Para validar a metodologia, um conjunto de dados abrangentes de falhas de circuito cruzado foi simulado usando um modelo *Simulink/SimPowerSystem*. Os resultados indicam uma taxa de alta precisão para o diagnóstico de falhas em linhas de transmissão de circuito duplo em comparação com outras abordagens com base em RNA encontradas na literatura.

Uzubi, Ekwue e Ejiogu (2017) apresentam uma detecção, classificação e localização de falhas baseadas em RNA aplicadas a uma parte de uma linha de transmissão de $132kV$. O objetivo é avaliar o desempenho de relés baseados em *RNA* conectados em ambas as extremidades da linha usando o algoritmo de retro propagação não-linear supervisionado com a topologia da rede Levenberg-Marguardt. Por meio de simulação computacional no software *PSCAD/EMTP®*, falhas de ambas as extremidades da linha de transmissão são

geradas com várias variações de ângulo, localização e resistência de inicialização de falha. As correntes de falhas são então extraídas, processadas e divididas em treinamento e testes de dados usando o software *MATLAB*[®]. Os resultados obtidos a partir das simulações são validados usando dados reais extraídos do relé baseado em microprocessador conectado à linha de transmissão. Os resultados demonstram a capacidade da *RNA* de identificar, classificar e localizar corretamente uma falha real ocorrendo nessa linha de transmissão com alta precisão.

Capítulo 3

Sistema de Transmissão de Energia Elétrica

Um sistema elétrico de potência (*SEP*) é constituído por usinas geradoras de energia (hidrelétricas, termelétrica, termonucleares, fontes alternativas, e pequenas centrais elétricas), por linhas de transmissão (*LTs*) (compostas por torres, cabos), por subestações elevadoras e abaixadoras (compostas por transformadores, bancos de capacitores, chaves, disjuntores) e por linhas de distribuição, (compostas por transformadores, postes e cabos e medição de consumo). Cada componente do sistema possui funções distintas e bem definidas. Os geradores transformam energia mecânica em energia elétrica e injetam a potência gerada na rede de transmissão. Compreende-se por transmissão a transferência de energia através de linhas, entre um centro gerador e um centro consumidor. A transmissão da energia elétrica é efetuada em tensões elevadas, caracterizando assim a necessidade dos transformadores. Pode-se caracterizar o sistema transmissão como sendo aquele que possui tensão igual ou superior a $230kV$ e o sistema distribuição como sendo o que engloba tensões de 69 a 138 kV (NERI, 2015).

Todo este complexo sistema tem centenas e até milhares de quilômetros, como é o caso do Brasil por exemplo, que apresenta tamanho e características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial. O sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil é um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e com múltiplos proprietários. O Sistema Interligado Nacional (*SIN*) é formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da região Norte. Dados do Operador Nacional do Sistema (*ONS*) mostram que 1,7% da energia requerida pelo país encontram-se fora do *SIN*, em pequenos sistemas isolados localizados principalmente na região amazônica. A Figura 3.1 ilustra, de forma esquemática, a configuração do *SIN* referente ao sistema de transmissão 2013/2015 indicando também instalações a

serem implantadas no futuro imediato (obras já licitadas, em construção)(NERI, 2015).

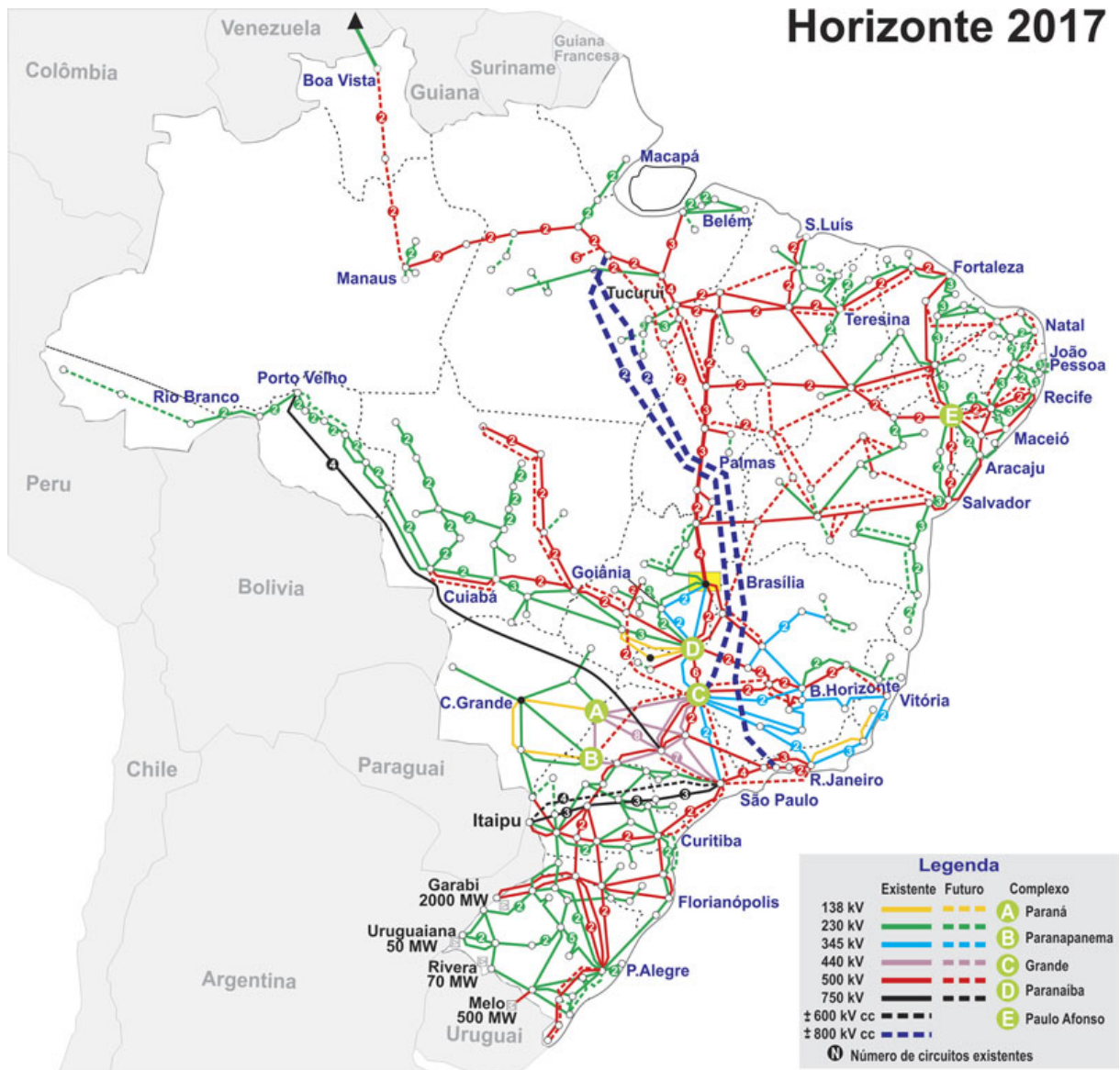


Figura 3.1: SIN, com destaque para os comprimentos das linhas de transmissão referentes ao ano de 2017. Fonte: (SINDAT. . . , 2017).

O objetivo de uma linha de transmissão é transportar energia elétrica das usinas geradoras aos centros de consumo. Este transporte é realizado a altos níveis de tensão a fim de reduzir as bitolas dos condutores usados e minimizar as perdas por efeito Joule. Esta transmissão pode ser realizada em corrente alternada (CA), sendo a forma mais usual, ou ainda em corrente contínua (CC).

Para linhas em corrente alternada, adota-se o sistema polifásico onde circuitos ou sistemas nas quais as fontes em corrente operam com mesmo valor de frequência, mas com valores de ângulos de defasagens distintos. Um caso particular do sistema polifásico é o

sistema trifásico, que por razões técnicas e econômicas é o padrão em geração, transmissão e distribuição. No que diz respeito à Física, uma tensão elétrica é a medida da diferença de potencial elétrico entre dois pontos, tendo proveniência de natureza eletromagnética com comportamento ondulatório. No Sistema Internacional de Medidas (*SI*) a unidade de tensão elétrica é o *Volt (V)*, sendo que $1V$ é equivalente a $\frac{1 \text{ Joule}}{\text{Coulomb}}$ (*Joule - J* é medida de energia, *Coulomb - C* é medida de carga elétrica). A Equação 3.1 representa a tensão elétrica (IRWIN, 2010).

$$v_n(t) = V_{rms} \sqrt{2} \cos(\omega t + \varphi_n) \quad (3.1)$$

Onde: $v_n(t)$ é a tensão entre duas fases da linha; V_{rms} é a tensão média eficaz da linha; $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular e f é a frequência fundamental de operação do sistema (no Brasil é de $60Hz$); $\varphi_n = 2\pi \frac{(n-1)}{p}$ é o ângulo de defasagem em questão e $n = (1, 2, \dots, p)$. No sistema trifásico $p = 3$.

Para circuitos em corrente alternada as unidades de medidas, como por exemplo, tensão, corrente (*Ampère - A*), potência (*Volt-Ampère - VA*), impedância (*Ohm-Ω*) são grandezas escalares complexas, que podem ser representadas por meio de fasores, como por exemplo para a Equação 3.1:

$$V_n = V_{rms} \angle^{(\omega + \varphi_n)} \quad (3.2)$$

Onde: $Re \cos\left(\tan^{-1} \frac{Im}{Re}\right) + jIm \sin\left(\tan^{-1} \frac{Im}{Re}\right) = \sqrt{Re^2 + Im^2} \angle^{(\tan^{-1} \frac{Im}{Re})}$; $j = \sqrt{-1}$

A Figura 3.2 mostra à esquerda o aspecto de um gerador trifásico com quatro polos, e à direita o gráfico de tensão proveniente deste gerador.

3.1 Modelos de Linha de Transmissão

O uso de um modelo matemático tem como objetivos possibilitar a explicação do fenômeno em estudo, permitir a realização de previsões do comportamento do sistema baseados em informações passadas e com isso permitir a tomada de decisões (VELASCO, 2013). Evidentemente, um modelo não é capaz de descrever fielmente o comportamento do sistema modelado, mas deve ser capaz de descrever as principais propriedades do sistema gerando resultados compatíveis com o real.

Partindo destes princípios, existem dezenas de modelos matemáticos que buscam descrever o comportamento das linhas de transmissão. Cada um destes modelos levam em consideração fatores que se acomodam às características da linha estudada. Comprimento

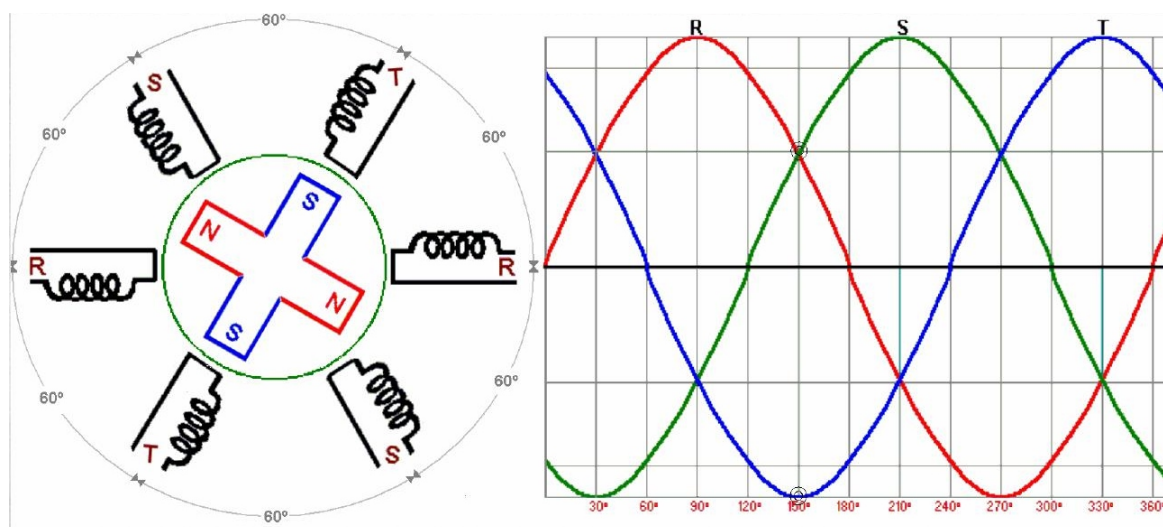


Figura 3.2: Esquema interno de um gerador trifásico e gráficos das tensões de saída. Fonte: Adaptado de (KOSOW, 1985).

da linha, nível de precisão alcançada pelo modelo utilizado são fatores que influenciam na escolha do modelo a ser utilizado. Linhas com até 80 *km* são chamadas de linhas curtas, e em alguns estudos, despreza-se a capacitância dessas linhas por apresentar valor muito pequeno, logo, representa-se a linha apenas por uma resistência e indutância. Já linhas com extensão entre 80 *km* e 240 *km* são consideradas médias e são comumente representadas pelo modelo *PI*. Enquanto que linhas maiores que 240 *km*, são consideradas longas e representadas por mais de um modelo *PI* ou pelo modelo de parâmetros distribuídos. (LEMOS, 2008)

O impacto do modelo de linha a ser adotado se refere principalmente ao comprimento de onda dado por $\lambda = \frac{c}{f}$, onde λ é o comprimento de onda, c a velocidade e f a frequência. Para linhas a 60 *Hz* tem-se $\lambda = 5000 \text{ km}$, uma vez que $c \approx \frac{300000 \text{ km}}{\text{s}}$. Leão (2012) mostra os erros cometidos para diferentes aproximações (diferentes modelos) consideradas para comprimentos distintos de linhas de transmissão. O trabalho evidencia, através de erros médios relativos, os valores de 80 *km* e 240 *km* como limites a serem considerados ao se adotar modelos matemáticos.

3.1.1 Parâmetros das Linhas de Transmissão

As linhas de transmissão de energia elétrica apresentam quatro parâmetros distintos que influenciam no transporte de energia. São eles:

- Resistência (*R-Ohm*): oferece resistência à passagem das correntes, e com isso dissipa energia (potência ativa) por efeito Joule;

- Condutância (*G-Siemen*): representação de correntes de fuga entre condutores e pelos isoladores (principal fonte de condutância). Seu valor depende das condições de operação da linha, da umidade relativa do ar, nível de poluição, etc. Por estas razões seu valor é muito variável e seu efeito é em geral desprezado, pois sua contribuição no comportamento geral da linha é muito pequena;
- Indutância (*L-Henry*): deve-se aos campos magnéticos criados pela passagem das correntes;
- Capacitância (*C-Farad*): deve-se aos campos elétricos. Cargas nos condutores por unidade de diferença de potencial entre eles.

As influências oferecidas pela indutância e pela capacitância no circuito são chamadas de reatância indutiva ($X_L = 2\pi fL$) e reatância capacitiva ($X_C = \frac{1}{2\pi fC}$), respectivamente. A associação de uma resistência com uma reatância forma a impedância ($Z = R - jX_C$ ou $Z = R + jX_L$), onde f é a frequência fundamental da rede e $j = \sqrt{-1}$ é a unidade dos números imaginários.

Quando se utiliza um modelo para representação de uma linha estes parâmetros devem ser considerados, e para efeito de simplificação matemática, estes sofrem aproximações dos reais efeitos que proporcionam ao circuito. Uma simplificação, por exemplo, é considerar que os parâmetros são igualmente distribuídos ao longo da linha, sendo usado seus cálculos por unidade de comprimento (HESSE, 1961). Com base nestes valores que representam fenômenos físicos que ocorrem na operação das *LTs*, pode-se obter um circuito equivalente (modelo) para a mesma.

3.1.2 Modelo de linhas curtas

Este é um dos modelos mais simples para a representação de linhas de transmissão. Para linhas curtas considera-se diretamente a impedância série e os efeitos capacitivos da admitância *shunt* são desprezados. A linha, de comprimento d , é representada somente por uma impedância série $Z = z \times d$ como mostrado na Figura 3.3.

Através da Lei de Kirchoff para as Tensões (*LKT*) tem-se o sistema.

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

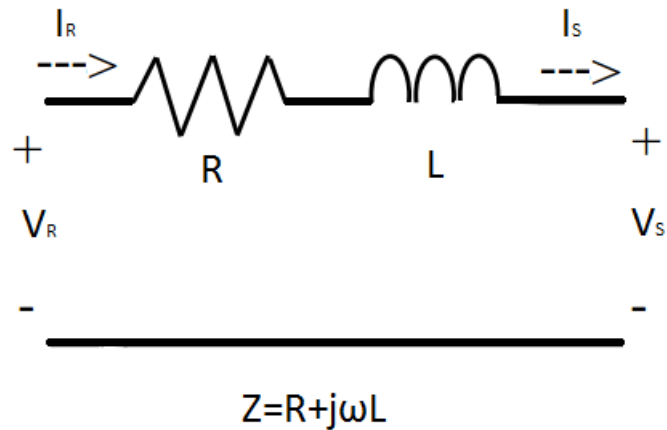


Figura 3.3: Modelo de linha curta. Fonte: Adaptado de (ZANETTA, 2003).

3.1.3 Modelo PI (π)

A admitância em paralelo, geralmente uma capacitância pura, é incluída nos cálculos de uma linha de transmissão de comprimento médio. Quando toda esta admitância for suposta concentrada no meio do circuito representativo da linha tem-se o modelo T . Quando a admitância total em paralelo é dividida em duas partes iguais tem-se o modelo PI . A Figura 3.4 ilustra tal modelo.

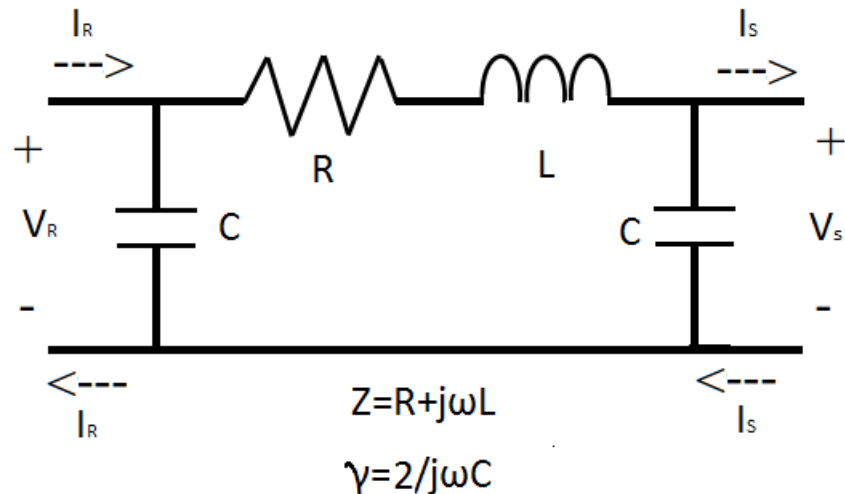


Figura 3.4: Distribuição dos parâmetros no modelo PI . Fonte: Adaptado de (ZANETTA, 2003).

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z\gamma}{2} + 1 & Z \\ \gamma + \frac{Z\gamma^2}{4} & \frac{Z\gamma}{2} + 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

3.1.4 Modelo de Parâmetros Distribuídos

Este modelo considera o fato de que os parâmetros não estão concentrados em uma determinada parte como ocorre em circuitos, mas sim distribuídos ao longo de toda a linha. Para linhas de menores extensões, considerar os parâmetros concentrados pode levar a erros aceitáveis, mas quando estes modelos são utilizados em linhas longas os erros se tornam maiores, pela inconsistência de concentração dos parâmetros com a realidade. Para conseguir-se uma solução mais exata para qualquer LT bem como para se obter um alto grau de precisão no cálculo de linhas com mais de 160 km, deve-se considerar a distribuição dos parâmetros. Tal modelo é ilustrado na Figura 3.5. Os valores de distribuição dos parâmetros são dados por unidade de comprimento Δz .

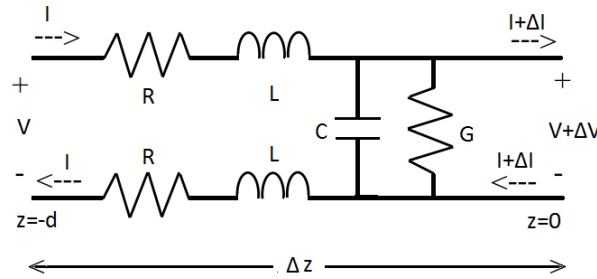


Figura 3.5: Modelo de parâmetros distribuídos. Fonte: Adaptado de (ZANETTA, 2003).

Tomando $R' = \frac{R}{\Delta z}$, $L' = \frac{L}{\Delta z}$ e $C' = \frac{C}{\Delta z}$, e através da LKT:

$$-v + \frac{R' \Delta z}{2} i + \frac{L' \Delta z}{2} \frac{\partial i}{\partial t} + v + \Delta v + \frac{R' \Delta z}{2} i + \frac{L' \Delta z}{2} \frac{\partial i}{\partial t} = 0 \quad (3.5)$$

A equação 3.5 pode ser desenvolvida e expressa por unidade de comprimento Δz conforme abaixo:

$$\frac{\Delta v}{\Delta z} = -R' i - L' \frac{\partial i}{\partial t} \quad (3.6)$$

Fazendo $\Delta z \rightarrow 0$, isso implica em $\Delta v \rightarrow 0$. Logo:

$$\frac{\partial v}{\partial z} = -R' i - L' \frac{\partial i}{\partial t} \quad (3.7)$$

Reescrevendo no domínio da frequência, em forma de fasores:

$$\frac{\partial \dot{V}}{\partial z} = -(R' + j\omega L') \dot{I} \quad (3.8)$$

Com o desenvolvimento de uma análise da Lei de Kirchoff para as correntes (*LKC*):

$$-i + i + \Delta i + G' \Delta z(v + \Delta v) + C' \Delta z \frac{\partial(v + dv)}{\partial t} = 0 \quad (3.9)$$

A Equação 3.9 pode ser desenvolvida e expressa por unidade de comprimento Δz conforme abaixo:

$$\frac{\Delta i}{\Delta z} = -G' v - C' \frac{\partial v}{\partial t} \quad (3.10)$$

Fazendo $\Delta z \rightarrow 0$, isso implica em $\Delta i \rightarrow 0$. Logo:

$$\frac{\partial i}{\partial z} = -G' v - C' \frac{\partial v}{\partial t} \quad (3.11)$$

Reescrevendo no domínio da frequência, em forma de fasores:

$$\frac{\partial \dot{I}}{\partial z} = -(G' + j\omega C') \dot{V} \quad (3.12)$$

Derivando novamente a Equação 3.8 e substituindo $\frac{\partial \dot{I}}{\partial z}$ na Equação 3.12, vem que:

$$\frac{\partial^2 \dot{V}}{\partial z^2} = (R' + j\omega L')(G' + j\omega C') \dot{V} \quad (3.13)$$

Três constantes são descritas pela Equação 3.14

$$\begin{aligned} \gamma &= \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} \\ \gamma &= \alpha + j\beta \end{aligned} \quad (3.14)$$

Onde γ é a constante de propagação, α é a constante de atenuação e β a constante de fase.

Simplificando a Equação 3.13 através da constante de propagação:

$$\frac{\partial^2 \dot{V}}{\partial z^2} = \gamma^2 \dot{V} \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial \dot{I}}{\partial z} = -\frac{\gamma^2}{(R' + j\omega L')} \dot{V} \quad (3.16)$$

E simplifica-se através da impedância característica $Z_o = \sqrt{\frac{(R' + j\omega L')}{(G' + j\omega C')}}$. Com isso as

soluções de \dot{V} e \dot{I} são dadas por:

$$\dot{V}(z) = Ae^{\gamma z} + Be^{-\gamma z} \quad (3.17)$$

$$\dot{I}(z) = \frac{-Ae^{\gamma z} + Be^{-\gamma z}}{Z_o} \quad (3.18)$$

Considerando uma linha de comprimento d e aplicando as condições de contorno, onde $z = 0$, $V = V_C$ (tensão na carga), $I = I_C$ (corrente na carga) e $Z_C = \frac{V_C}{I_C}$ (impedância da carga) às Equações 3.17 e 3.18, vem que:

$$A = \frac{V_C - Z_o I_C}{2} \quad (3.19)$$

$$B = \frac{V_C + Z_o I_C}{2} \quad (3.20)$$

Substituindo as Equações 3.19 e 3.20 nas Equações 3.17 e 3.18, e utilizando senos e co-senos hiperbólicos, é possível escrever na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma d) & Z_o \sinh(\gamma d) \\ \frac{\sinh(\gamma d)}{Z_o} & \cosh(\gamma d) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_C \\ I_C \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

A Equação matricial 3.21 permite calcular a tensão e corrente em qualquer ponto na linha de transmissão a partir das informações de impedância característica e tensão e corrente da carga.

3.1.5 Modelo JMARTI

Sabe-se que uma linha de transmissão de energia elétrica possui uma característica básica que é o fato de seus parâmetros longitudinais e transversais serem distribuídos ao longo do comprimento da mesma. Esta característica, juntamente com o fato de que os parâmetros longitudinais da linha são variáveis em função da frequência, tornam a linha de transmissão de energia elétrica um elemento com certas particularidades que devem ser levadas em consideração no momento de sua representação. Porém, as soluções matemáticas fechadas das equações de linha dependentes da frequência no domínio do tempo são muito difíceis, e por isso técnicas de aproximação numérica são necessárias para soluções práticas. A natureza oscilatória do problema, no entanto, torna as técnicas numéricas comuns muito suscetíveis à instabilidade e a erros de precisão. O método *JMARTI* visa superar essas dificuldades numéricas (MARTI, 1982).

Um dos aspectos mais importantes para modelagem de linhas de transmissão com

a finalidade de estudar fenômenos eletromagnéticos transientes é a forte dependência dos parâmetros desta linha com a frequência. Os modelos que assumem parâmetros não distribuídos e constantes não se adequam à ampla faixa de frequências que estão presentes nos sinais durante condições transitórias. Na maioria dos casos, o parâmetro constante na representação produz uma ampliação dos harmônicos superiores dos sinais e, como consequência, uma distorção geral das formas da onda e dos picos de magnitude exagerados (MARTI, 1982).

Em teoria, são possíveis muitas alternativas para a formulação da solução para as equações da linha exata. Na prática, no entanto, a natureza de uma linha de transmissão é tal que sua resposta como função de frequência é altamente oscilatória. Como consequência, os problemas numéricos que podem ser encontrados no processo de solução são altamente dependentes da abordagem particular. O modelo *JMARTI* evita uma série de dificuldades numéricas encontradas em formulações anteriores. Este modelo é preciso, geral e não tem problemas de estabilidade.

A partir dos estudos apresentados em (DOMMEL, 1969; BUDNER, 1970; SNELSON, 1972; MEYER; DOMMEL, 1974), Marti (1982) aprimorou os modelos anteriores e realizou testes em seu novo modelo de LT com uma ampla gama de comprimentos de linha (5 a 500 milhas) para os modos de sequência zero e positiva. O mesmo algoritmo descrito pode modelar com precisão os diferentes comprimentos e modos de linha em toda a faixa de frequência, a partir de $0Hz$ (corrente contínua). O algoritmo não exige intervenção do usuário, dispensando análises para ajustes do modelo.

Através da análise de circuito da Figura 3.6, e de forma similar ao modelo de parâmetros distribuídos descrito na Subseção 3.1.4

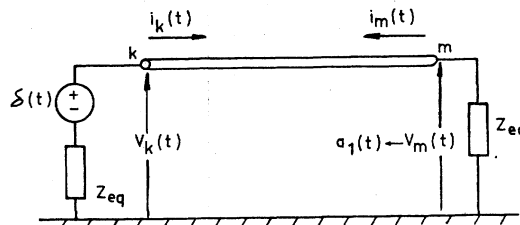


Figura 3.6: Interpretação física da função $a_1(t)$ para o modelo JMARTI. Fonte: (MARTI, 1982).

E por meio da resolução do sistema de equações diferenciais de governo, tem-se o

Sistema de Equações 3.22.

$$\begin{bmatrix} V_K(\omega) \\ I_K(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma(\omega)d) & -Z_C \sinh(\gamma(\omega)d) \\ \frac{\sinh(\gamma(\omega)d)}{Z_C} & -\cosh(\gamma(\omega)d) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_m(\omega) \\ I_m(\omega) \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Marti (1982) propõe novas funções de ponderação no domínio da frequência, conforme mostrado a seguir.

A Equação 3.23 mostra, de forma matricial e no domínio da frequência, a propagação de ondas em modo *à vante* para os nodos k e m no circuito da Figura 3.6:

$$\begin{bmatrix} F_k(\omega) \\ F_m(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_k(\omega) & I_k(\omega) \\ V_m(\omega) & I_m(\omega) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ Z_{eq}(\omega) \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

O mesmo é feito para o modo *à ré* conforme Equação 3.24:

$$\begin{bmatrix} B_k(\omega) \\ B_m(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_k(\omega) & -I_k(\omega) \\ V_m(\omega) & -I_m(\omega) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 \\ Z_{eq}(\omega) \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Onde $Z_{eq}(\omega) = \lim_{\omega \rightarrow \infty} Z_c(\omega)$.

Comparando a Equação 3.24 com a solução de linha geral no domínio da frequência nas Equações 3.22, segue-se que

$$B_k(\omega) = A_1(\omega)F_m(\omega) \quad (3.25)$$

$$B_m(\omega) = A_1(\omega)F_k(\omega) \quad (3.26)$$

$$A_1(\omega) = e^{-\gamma(\omega)l} = \frac{1}{\cosh[\gamma(\omega)l] + \sinh[\gamma(\omega)l]}$$

As Equações 3.25 e 3.26 no domínio do tempo são mostradas nas Equações 3.27 e 3.28.

$$b_k(t) = \int_{\tau}^{\infty} f_m(t-u)a_1(u)du \quad (3.27)$$

$$b_m(t) = \int_{\tau}^{\infty} f_k(t-u)a_1(u)du \quad (3.28)$$

Onde τ é a componente de frequência mais rápida do impulso injetado.

A forma do domínio do tempo de $A_1(\omega)$ é a função $a_l(t)$ mostrado na Figura 3.7

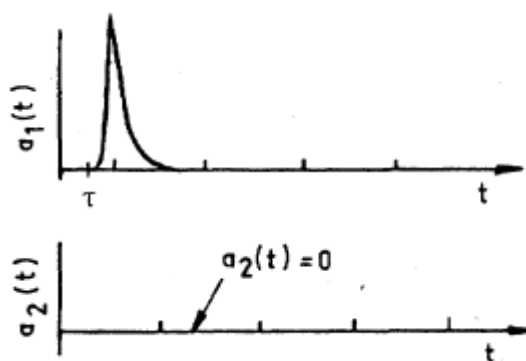


Figura 3.7: Interpretação física da função $a_1(t)$ para o modelo JMARTI (MARTI, 1982). A função $a_2(t)$ é utilizada nos modelos anteriores ao JMARTI. Fonte: (MARTI, 1982).

Considerando um incremento temporal ΔT , pode-se ver que os valores de $b_k(t)$ e $b_m(t)$ são definidos a partir de seus valores passados, podendo assim serem reescritos como uma função f destes valores:

$$b_k(t) = f(b_k(t - \Delta t)) \quad (3.29)$$

$$b_m(t) = f(b_m(t - \Delta t)) \quad (3.30)$$

Das Equações 3.25 e 3.26 obtém-se as tensões

$$v_k(t) = e_k(t) + E_{kh} \quad (3.31)$$

$$v_m(t) = e_m(t) + E_{mh} \quad (3.32)$$

que são as tensões ilustradas na Figura 3.8 a seguir.

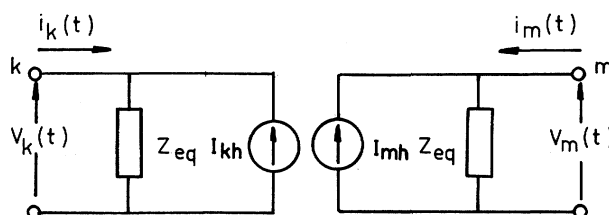


Figura 3.8: Novo modelo de linha para frequência dependente para os nodos k e m . Fonte: (MARTI, 1982).

As tensões $e_k(t)$ e $e_m(t)$ são as tensões em Z_{eq} . Depois de converter para uma representação modal, as Equações dão em cada passo de tempo t os modelos de linha equivalentes mostrados na Figura 3.8

Para o cálculo da impedância equivalente Z_{eq} é feito conforme associação de resistores

e capacitores da Figura 3.9:

$$Z_{eq} = k_0 + \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{s + p_i} \quad (3.33)$$

$$R_0 = k_0 ; R_i = k_i/p_i ; c_i = 1/k_i ; s = \sigma + j\omega$$

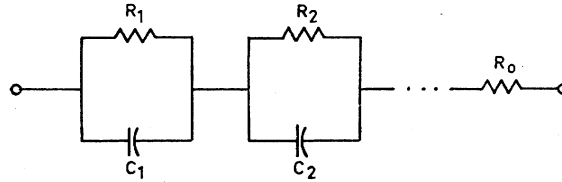


Figura 3.9: Modelo para associação de resistores e capacitores. Fonte: (MARTI, 1982).

Para a determinação das correntes $i_k(t)$ e $i_m(t)$

$$s(t) = \int_T^{\infty} f(t-u) \dot{k} e^{-\alpha(u-T)} du \quad (3.34)$$

$$s(t) = \dot{m}s(t - \Delta t) + \dot{p}f(t - T) + \dot{q}f(t - T - \Delta t)$$

Onde: \dot{m} , \dot{p} e \dot{q} são constantes que dependem de \dot{k} , α , do passo de integração de $A(t)$, e da técnica numérica de interpolação.

Da Figura 3.8 pode-se concluir que $a_1(t)$ pode ser expresso por:

$$a_1(t) = p(t - \tau) \quad (3.35)$$

Onde: $p(t)$ tem a mesma forma que $a_1(t)$, porém deslocado τ unidades de tempo para a origem.

Com base nas propriedades da Transformada de Fourier, a Equação 3.35 é escrita no domínio da frequência como:

$$A_1(\omega) = P(\omega) e^{-j\omega\tau} \quad (3.36)$$

A função $P(s)$ correspondente a $P(\omega)$ no plano complexo é aproximada pela função racional na forma:

$$P_a(s) = H \prod_{i=1}^n \frac{s + z_i}{s + p_i} \quad (3.37)$$

$$(3.38)$$

Por meio de uma expansão em frações parciais da Equação 3.37, e posteriormente

transformação para o domínio temporal, $a_1(t)$ pode ser aproximado por:

$$a_1 = v(t - \tau) \sum_{i=1}^m k_i e^{-p_i(t-\tau)} \quad (3.39)$$

A partir do qual as integrais dos valores passados (Equações 3.27 e 3.28) podem ser avaliadas recursivamente.

A corrente e tensão de curto-circuito no terminal da linha é dada por

$$I_k = \frac{E_s}{Z_c} \frac{1 + A_1^2}{1 - A_1^2} \quad (3.40)$$

$$V_m = E_s \frac{2A_1}{1 + A_1^2} \quad (3.41)$$

Onde E_s é a fonte de tensão aplicada.

O modelo JMARTI é aqui apresentado com intuito de fazer uma contribuição acadêmica visto que este modelo, embora seja amplamente utilizado e mencionado em diversos artigos e trabalhos, é detalhado apenas em livros especializados no assunto. O próprio artigo (MARTI, 1982) não é muito claro, pois grande parte das informações nele mencionadas são explicadas em outros artigos citados. O modelo JMARTI utilizado para geração de dados de faltas utilizados nesta pesquisa já está implementado no *software* ATPDraw[®].

3.2 Falhas e Proteção em Linhas de Transmissão

No percurso entre a fonte geradora, seja ela hídrica, térmica, eólica, nuclear ou qualquer outra, a transmissão está sujeita a perturbações e anomalias de funcionamento. Descargas atmosféricas, surtos de tensão, vandalismo e incêndios são algumas das ameaças às quais um sistema de transmissão está sujeito. E buscando prever a ocorrência destas anomalias, meios de proteção são implementados no início e ao longo da rede. Estes dispositivos atuam de modo a evitar as falhas elétricas e limitar os defeitos caso a falha ocorra. Características como sensibilidade, seletividade, velocidade, confiabilidade e precisão necessitam ser dimensionadas para atender as necessidades do sistema, não excedê-las demasiadamente, evitando assim tornar inviável a instalação de proteções em linhas de transmissão.

Ao se analisar a proteção de sistemas elétricos é necessário distinguir situações de operação do sistema. Em situações de operação normal tem-se a ausência de falhas nos

equipamentos de operação ou falhas aleatórias. Já em uma situação de anormalidade ocorrem distúrbios na rede elétrica, tais como oscilações nos níveis de tensão, mas com a corrente não atingindo níveis de curto-circuito. E em situações de curto-circuito pode ocorrer danos irreversíveis a todo o sistema (geração, transmissão e distribuição).

Conforme mencionado, são diversos os fenômenos que podem vir a ocorrer nos sistemas elétricos. Estes fenômenos podem ser agrupados conforme a velocidade de suas ocorrências.

Sinais transitórios ultra rápidos, surtos, podem por exemplo ser causados por uma descarga atmosférica ou pelo chaveamento da rede. Sua natureza é totalmente elétrica, sendo causados pela reflexão e refração de ondas eletromagnéticas entre os terminais do trecho da linha onde ocorreu o fenômeno. Tem uma curta duração de apenas alguns milésimos de segundos.

Já transitórios meio rápidos, curto circuitos, têm origem em mudanças estruturais bruscas. Se devem ao contato indevido entre as partes energizadas que constituem as fases (F) e o referencial terra (T), e são classificados conforme o número de elementos envolvidos. Por ordem de severidade, os curtos são:

- Curto circuito entre as três fases (trifásico). Na Figura 3.10 a seguir é ilustrada uma falta trifásica:

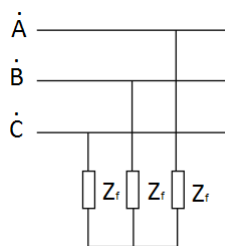


Figura 3.10: Falta trifásica. Fonte: Adaptado de (SOUZA; CHRISTO; ALMEIDA, 2017c).

- Curto circuito entre duas fases (bifásico). A Figura seguinte mostra um curto circuito que pode se dar entre duas fases e o terra, Figura 3.11, ou apenas entre duas fases, Figura 3.12:

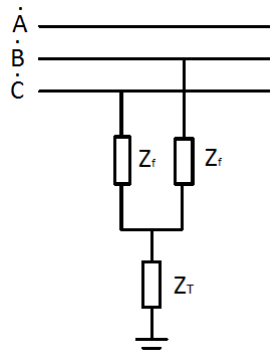


Figura 3.11: Falta bifásica aterrada. Fonte: Adaptado de (SOUZA; CHRISTO; ALMEIDA, 2017c).

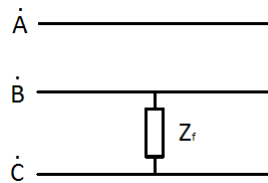


Figura 3.12: Falta bifásica sem componente terra. Fonte: Adaptado de (SOUZA; CHRISTO; ALMEIDA, 2017c).

- Curtos circuitos entre uma fases e o terra. Uma falta monofásica é mostrada na Figura 3.13:

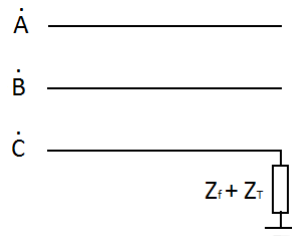


Figura 3.13: Falta monofásica. Fonte: Adaptado de (SOUZA; CHRISTO; ALMEIDA, 2017c).

De todos os componentes de um sistema elétrico de potência o que é mais propenso a ocorrência de anomalias é a linha de transmissão, devido às suas dimensões e exposição a influências externas e entre suas fases. A Tabela 3.1 mostra os dados estatísticos em percentuais para ocorrências de faltas nos componentes do *SEP*. Aproximadamente 50% das faltas ocorrem em linhas aéreas. No sistema elétrico brasileiro, as linhas de transmissão correspondem a 68% das ocorrências de falta da rede (FILHO; MAMEDE, 2000).

Segundo (PAITHANKAR; BHIDE, 2010), das ocorrências de faltas em linhas aéreas, 85% correspondem a situações de faltas monofásicas, 8% são faltas bifásicas, 5% faltas

Tabela 3.1: Percentual de faltas por equipamentos no *SEP*.

Tipo de Equipamento	Porcentagem Total
Linhas aéreas	50
Disjuntores	12
Equipamentos de controles e transformadores para instrumentos	12
Transformadores e reatores	10
Cabos Subterrâneos	9
Geradores	7

(Fonte: (PAITHANKAR; BHIDE, 2010).)

bifásicas aterradas e apenas 2% correspondem às faltas trifásicas. A Figura 3.14 ilustra esta distribuição estatística em percentuais.

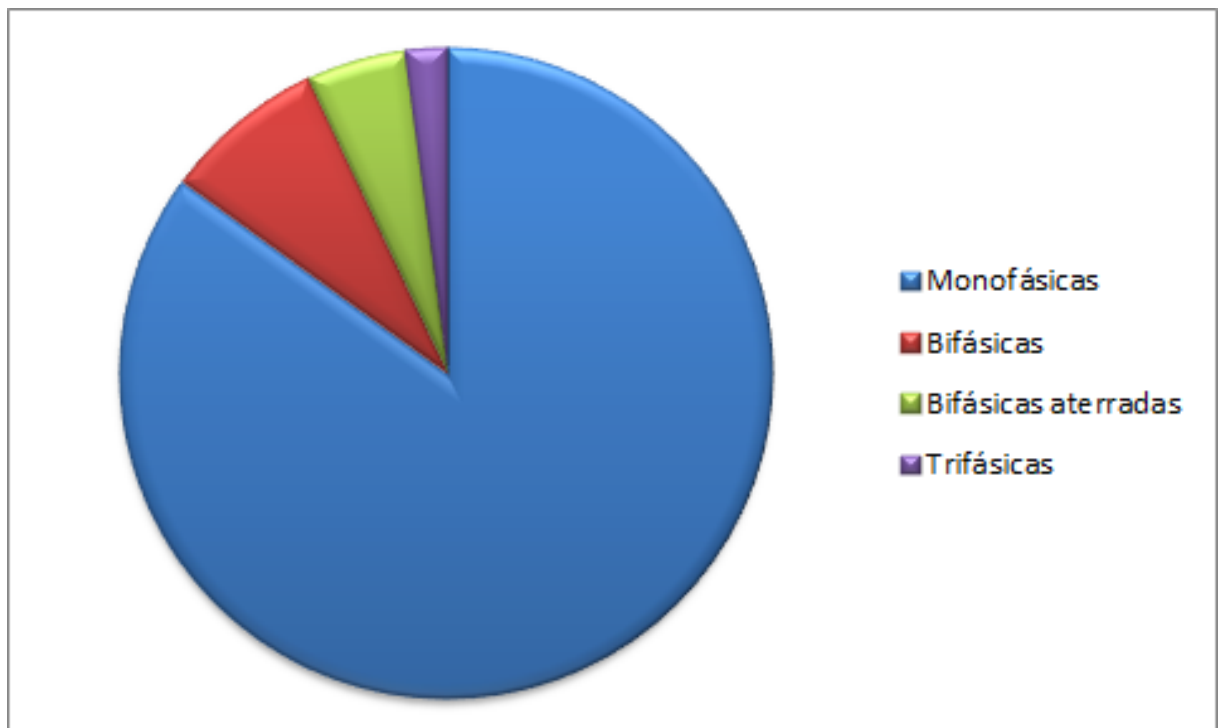


Figura 3.14: Percentuais de ocorrências das possíveis situações de faltas nas linhas de transmissão trifásicas. Fonte: Baseado em (PAITHANKAR; BHIDE, 2010).

Ainda com relação às linhas aéreas, segundo Bezerra et al. (2010), dentre as principais causas de faltas está a perda de funcionalidade por parte de isoladores, sendo esses componentes da linha responsáveis por manter o isolamento elétrico entre as fases e a estrutura da torre oferecendo elevadíssimos valores de resistência ôhmica e rigidez dielétrica à passagem de corrente elétrica e a formações de arcos voltáicos. Estes componentes são normalmente compostos por polímeros e a exposição a fatores ambientais, elétricos e mecânicos, conforme mostrados na Figura 3.15, causam danos irreversíveis a sua es-

trutura molecular, que por sua vez acarretam na diminuição e gradativa perda de suas propriedades.

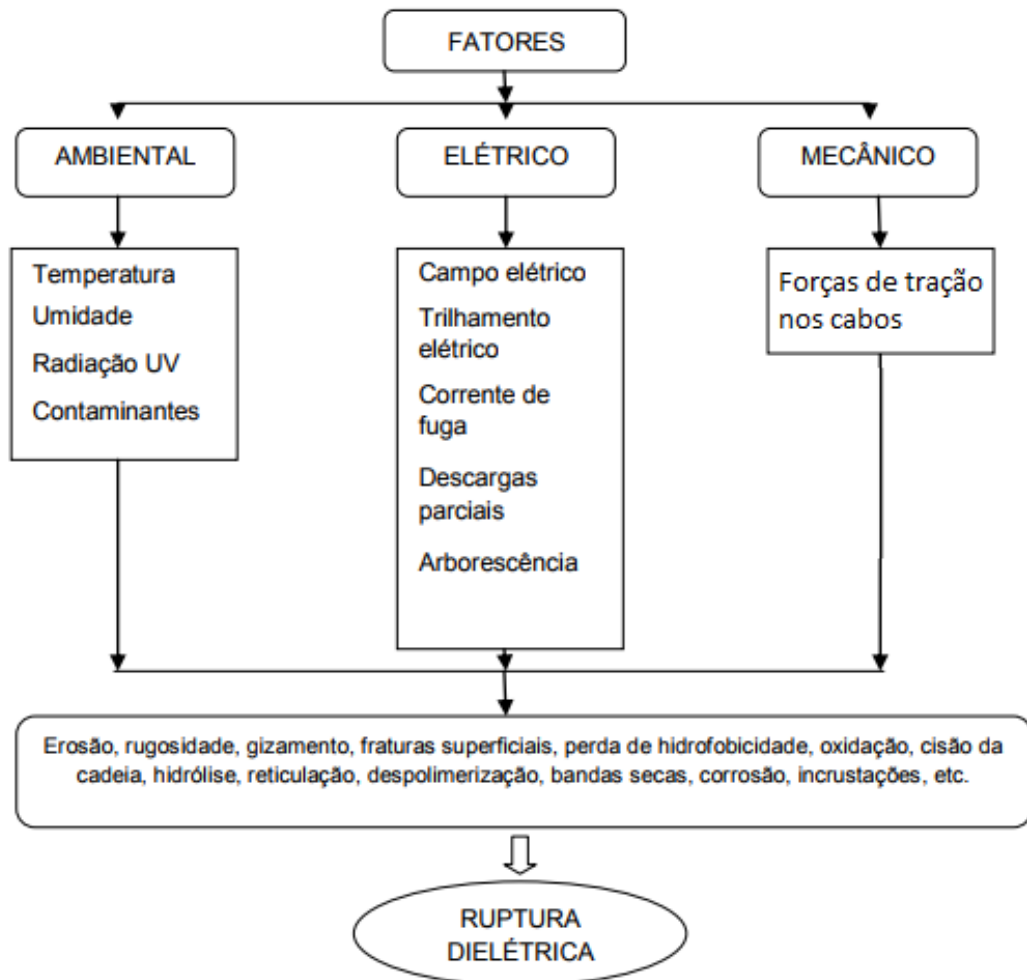


Figura 3.15: Processo de envelhecimento em isoladores poliméricos. Adaptado de (BEZERRA et al., 2010).

Esses isoladores têm ligação direta com os índices de segurança nas redes de transmissão elétrica, podendo influenciar diretamente nesses índices: Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (*DEC*) e Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora (*FEC*), usados pelas companhias elétricas para medir o índice de qualidade (PROTZEK, 2010).

Em novembro de 2009 ocorreu no Brasil uma interrupção no fornecimento de energia devido à uma falha em um conjunto de isoladores em um dos principais troncos de transmissão de energia do país. O transtorno ocorreu em uma subestação localizada em Itaberá (SP), onde, após a ocorrência de um curto circuito monofásico, houve uma evolução

para curtos bi e trifásicos. A ocorrência desencadeou desligamentos da linha defeituosa e de outras linhas em um efeito cascata. Falhas de perda de sincronismo, subtensão e subfrequência causaram a interrupção do fornecimento de energia em grande parte do país. Com uma duração média de $222min$, o apagão deixou de fornecer $24,5GW$, afetando também o país vizinho Paraguai, devido ao compartilhamento da usina binacional de Itaipú.

MME (2009, p.3) relata:

A ocorrência, classificada como blecaute grave, segundo os critérios definidos para elaboração do Boletim de Interrupção de Suprimento de Energia – BISE, teve origem no desligamento das LTs 765 kV Itaberá – Ivaiporã (circuitos 1, 2 e 3), por curtos circuitos provocados por descargas atmosféricas e/ou pela redução da suportabilidade dos isoladores submetidos a condições meteorológicas adversas (chuvas intensas e ventos).

Tal ocorrência enfatiza a importância de sistemas de proteção que sejam capazes de atuar prontamente mediante situações danosas às *LTs*. Além disso, que restrinjam suas ações isolando os danos, porém afetando o mínimo possível nos outros circuitos que se encontrem em normal funcionamento. Ainda, o acompanhamento estatístico de banco de dados das *LTs* propiciam verificar locais mais vulneráveis à ocorrências de defeitos, como por exemplo devido à redução de vida útil de isoladores, à diminuição da qualidade de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas (*SPDA*), dentre outros.

Para a proteção dos componentes do sistema elétrico os tipos de dispositivos de proteção mais comumente utilizados são relés, fusíveis, elos, disjuntores e *IED* (*Intelligent Electronic Device*). A proteção dos sistemas elétricos deve proporcionar, além da interrupção da eletricidade, com o objetivo de proteger linhas, barras e equipamentos, a possibilidade de monitorar dados com o intuito de se estudar posteriormente as causas das falhas ocorridas (COTOSCK, 2007).

Os relés são dispositivos destinados a operar quando uma grandeza de atuação atinge um determinado valor pré definido como crítico. Existem várias classificações atribuídas aos relés, quanto à grandeza de atuação (corrente, tensão, frequência, etc.), forma de conectar ao circuito (primário/ secundário), forma construtiva (eletromecânicos, mecânicos, estáticos, etc.), quanto à função (sobrecorrente, direcional, diferencial, etc.), característica de atuação (normal inverso, muito inverso, etc.), temporização (temporizados e instantâneos).

O tempo necessário para isolar uma falha depende da velocidade de cada elemento que constitui o sistema de proteção, Figura 3.16. A velocidade do sistema de proteção à distância depende da rapidez com que os transformadores de medição de corrente e

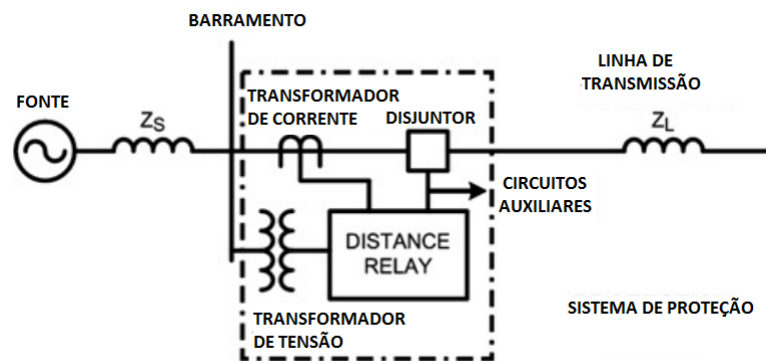


Figura 3.16: Representação simplificada das partes de um relé de proteção à distância. Adaptado de (AGUILAR; PÉREZ; ORDUÑA, 2011).

tensão, o relé de distância, os circuitos auxiliares e os disjuntores detectam e respondem às falhas no circuito. Uma maneira apropriada de melhorar a velocidade do sistema de proteção consiste em reduzir o tempo de operação do relé. Atualmente, são necessários sinais de pelo menos um ciclo ($16,7ms$ para frequência de potência de $60Hz$) em relés de distância para diagnosticar eficazmente os distúrbios da linha de transmissão (AGUILAR; PÉREZ; ORDUÑA, 2011).

A possibilidade de se localizar faltas com uma precisão relativamente razoável em uma linha de transmissão possibilita maior seletividade na atuação de relés, evitando por exemplo, a chamada *redundância*. Este termo é utilizado para designar uma proteção que “enxerga” e atua concomitantemente com a proteção principal. Valendo-se do fato de que um curto circuito gera sinais de tensão com comportamento de onda proporcional ao ponto de origem do curto na linha, a análise destes sinais gerados possibilita tanto a classificação quanto a localização destas faltas.

Capítulo 4

Fundamentação Teórica

Neste capítulo é feita uma exposição da metodologia de extração de dados de uma linha de transmissão, bem como as principais ferramentas matemáticas utilizadas para o processamento destes dados. São ainda apresentados alguns conceitos de Estatística relevantes para este trabalho. Por fim, é apresentada a *TOV*, teoria esta que rege o comportamento dos sinais aqui analisados. Técnicas já consagradas no meio utilizam a *TOV* para localização de faltas.

4.1 Técnicas de Processamento de Sinais

Um processo de análise automática de sinais tem como objetivo final a obtenção de uma descrição provável do evento registrado no oscilograma. Esta descrição é utilizada para preencher um banco de dados da concessionária de energia ou mesmo do *SIN*. Por sua vez, oscilogramas são arquivos de oscilografia gerados por um equipamento com função oscilográfica. Além do equipamento dedicado, o Registrador Digital de Perturbações (*RDP*), existem relés de proteção, medidores de qualidade de energia e remotas de supervisão e controle capazes de gerar tal informação. O arquivo de oscilografia registra a variação de grandezas analógicas e eventos lógicos ao longo do tempo com resolução de microsegundos (RODRIGUES et al., 2003).

Moreto e Rolim (2010) descrevem as etapas de um sistema de análise de oscilografia. Segundo seu trabalho, na primeira etapa é realizada a obtenção do registro de oscilografia, manual ou automaticamente, caso exista um sistema integrado de coleta e gerenciamento destes arquivos. Em alguns casos esta tarefa é realizada por um agente inteligente dedicado.

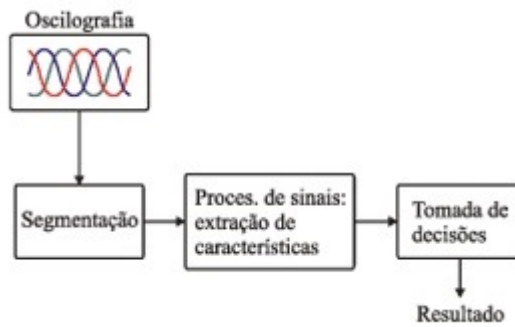


Figura 4.1: Etapas de um sistema de análise de sinais de oscilografia. Fonte: (MORETO; ROLIM, 2010).

Após a obtenção do registro de oscilografia, deve-se definir como os dados serão utilizados, ou seja, se todo o registro será processado de uma vez ou se a análise será feita em partes, através da segmentação do sinal. Esta escolha vai depender do tipo de distúrbio que se deseja analisar. Bollen e Gu (2006) definem basicamente dois tipos de distúrbios:

- Variações: São distúrbios em regime permanente, ou quase regime permanente, como, por exemplo, a existência de conteúdo harmônico indesejável na rede elétrica;
- Eventos: São distúrbios bruscos, como interrupções, afundamentos de tensão, faltas, entre outros.

Feita a segmentação, a próxima etapa é a extração de características em cada segmento. A escolha das características vai depender do problema abordado e da metodologia de solução. Na bibliografia pesquisada, as características mais utilizadas são:

- Valores médios ou eficazes das grandezas monitoradas (tensões e correntes) em cada segmento (STYVAKTAKIS; BOLLEN; GU, 2002), (MORETO; ROLIM, 2008);
- Valores médios de grandezas calculadas como potência elétrica ou componentes simétricas (KEZUNOVIC, 2000);
- Conteúdo harmônico dos dados, obtido através da transformada de Fourier (BRETTAS et al., 2006);
- Coeficientes de detalhe obtidos com a análise multirresolução da transformada wavelet (YOUSSEF, 2001 apud MORETO; ROLIM, 2010).

Segundo Simas (2012), pode-se observar experimentalmente que, o uso direto dos dados brutos (do modo como são medidos) como entradas para os classificadores geralmente

produz um desempenho pior do que quando algum pré-processamento é aplicado. O que justifica o melhor desempenho dos classificadores após a etapa de pré-processamento, uma vez que ela não é capaz de adicionar informação a respeito do problema, se deve ao fato de que os sistemas de classificação são projetados, em geral, a partir de um processo iterativo de treinamento. Então, um pré-processamento capaz de revelar características discriminantes pode se tornar decisivo para a obtenção de um classificador com melhor desempenho. Todas as informações utilizadas para a discriminação estão presentes nos dados brutos. O pré-processamento (extração de características), é responsável apenas por uma transformação que torna as características discriminantes mais acessíveis.

Conforme supracitado, nas etapas de segmentação e extração de características é comum o uso de técnicas automáticas digitais de processamento de sinais, sendo tal prática autorizada pelo *ONS*. Nesta seção são apresentadas algumas das dezenas de técnicas existentes para tratamento de sinais.

4.1.1 Mínimos Quadrados

O método de Mínimos Quadrados consiste em minimizar a distância euclidiana entre um conjunto de pontos ou medidas e uma função pré-estabelecida. Esta função pode ser uma reta, uma exponencial, uma polinomial, logarítmica, etc. Para eliminar valores negativos e estes se anulem juntamente com valores positivos de distâncias ao serem somados, faz-se a soma dos quadrados das distâncias euclidianas e busca-se minimizar o valor desta soma através de ajustes nos parâmetros da função utilizada conforme Equação 4.1.

$$\min \left\langle \sum_{i=1}^N (y_i - f(x_i))^2 \right\rangle \quad (4.1)$$

Onde: (x_i, y_i) são as coordenadas dos pontos medidos; $f(x_i)$ são os valores da função de ajuste para cada valor de x_i ; N é o número de pontos (amostra).

Uma das situações mais simples da utilização do método de mínimos quadrados (MMQ) se trata do ajuste polinomial, onde se busca representar os pontos a serem aproximados, por meio de uma equação polinomial. Desta forma, o método consiste em determinar os coeficientes do polinômio de forma a atender a Equação 4.1.

Sendo a Equação 4.2 uma representação geral de polinômios:

$$f(x) = \alpha_m x^m + \alpha_{m-1} x^{m-1} + \dots + \alpha_1 x^1 + \alpha_0 \quad (4.2)$$

Seus coeficientes ótimos são calculados conforme Equação 4.3 matricial abaixo:

$$\begin{bmatrix} N & \sum_{i=1}^N x_i & \cdots & \sum_{i=1}^N x_i^m \\ \sum_{i=1}^N x_i & \sum_{i=1}^N x_i^2 & \cdots & \sum_{i=1}^N x_i^{m+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^N x_i^{m+1} & \sum_{i=1}^N x_i^{m+2} & \cdots & \sum_{i=1}^N x_i^{2m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N f_i \\ \sum_{i=1}^N f_i x_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^N f_i x_m \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

4.1.2 Transformada de Fourier

A Transformada de Fourier (*TF*) (BROUGHTON; BRYAN, 2008) é uma ferramenta amplamente utilizada em diferentes campos como óptica, física, telecomunicações, computação, eletrônica e elétrica. Essencialmente ela consiste em uma transformação linear que troca a base do tempo para a base da frequência de um sinal (PEREIRA et al., 2016).

$$\mathcal{F}\{f(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (4.4)$$

Onde: $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular e f é a frequência nominal da LT.

A Equação 4.5 mostra a transformada discreta de Fourier

$$\hat{x}_k = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x_m e^{-2\pi jkm/N} \quad (4.5)$$

$$k = (0, 1, \dots, N-1)$$

Há ainda a transformada rápida de Fourier, do Inglês *fast Fourier transformer (FFT)* que reduz consideravelmente o tempo de execução computacional. Em (STOREY, 2002; GONÇALVES, 2011), é apresentado detalhadamente tanto o conceito matemático da FFT quanto sua utilização no *software MatLAB®*.

A grande desvantagem da *TF*, de maneira geral, para aplicação em análise de sinais é o fato de ela não ser capaz de fornecer informações sobre o tempo, apenas frequências. Sendo assim ela é útil para análise de sinais periódicos ou estacionários, ou seja, que apresentem um comportamento repetitivo ao longo tempo (PEREIRA et al., 2016)

4.1.3 Transformada Wavelet

Para suprir as deficiências da transformada de Fourier de tempo curto, do Inglês *short-time Fourier transform (STFT)*, no que diz respeito à relação entre resolução de frequência e tempo pode ser utilizada uma análise multiresolução. A ferramenta mais utilizada neste

caso é a Transformada *Wavelet* (*TW*) (BROUGHTON; BRYAN, 2008; FLEET, 2008). A *TW* é uma técnica de análise que avalia um dado sinal nos domínios tempo e frequência simultaneamente (MORETO; ROLIM, 2010). A *TW* é uma operação linear que decompõe um sinal em diferentes escalas com diferentes níveis de resolução (SILVEIRA; SEARA; ZURN, 2001). Uma *Wavelet* é uma função com algumas propriedades especiais. Em uma tradução literária, a expressão *Wavelet* significa onduleta, onda pequena. Uma *Wavelet* satisfaz as principais condições:

- tem uma energia finita concentrada em uma pequena faixa do domínio temporal;
- apresenta algumas oscilações no tempo com rápido decaimento.

A Transformada Wavelet contínua (*TWC*) é apresentada na Equação 4.6. Nesta equação é possível observar que $\Psi_{a,b}(t)$ é a decomposição da função original $f(t)$. Na realidade, $\Psi_{a,b}(t)$ desempenha o mesmo papel que as funções *seno* e *coseno* na *TF*, porém, trata-se de um conjunto de funções escalonadas e transladadas de uma função Ψ chamada de *Wavelet mãe*.

$$W(a, b) = \int f(t)\Psi_{a,b}(t)dt \quad (4.6)$$

A Equação 4.7 é um exemplo de uma *Wavelet mãe* chamada de *chapéu mexicano* devido ao formato gráfico por ela produzido.

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4.7)$$

4.2 Análise de Séries Temporais

Nesta seção são apresentados os modelos de Séries Temporais utilizados no presente estudo e também são abordados alguns conceitos básicos de estatística utilizados na classificação dos melhores modelos que representam os dados analisados.

4.2.1 Parâmetros Estatísticos

Nesta subseção são apresentados alguns conceitos básicos utilizados em Estatística e de importância para a compreensão dos modelos de Séries Temporais que são apresentados na sub sessão seguinte.

Considerando um processo estocástico estritamente estacionário, com N observações $(x_{t_1}, x_{t_2}, x_{t_3}, \dots, x_{t_N})$ associadas aos tempos $(t_1, t_2, t_3, \dots, t_N)$. Seja $p(x_t)$ uma função de distribuição de probabilidade válida para todo valor de t no intervalo de tempo acima.

- Média e Variância

$$E[x_t] = \mu = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x_t \quad (4.8)$$

$$E[(x_t - \mu)^2] = \sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (x_t - \mu)^2 \quad (4.9)$$

- Auto covariância

$$\eta_k = E[(x_t - \mu)(x_{t+k} - \mu)] \quad ; \quad k = (1, 2, \dots, N - 1) \quad (4.10)$$

- Auto correlação

$$\rho_k = \frac{E[(x_t - \mu)(x_{t+k} - \mu)]}{E[(x_t - \mu)^2]} = \frac{\eta_k}{\eta_0} \quad (4.11)$$

$$P_{(nXn)} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_2 & \cdots & \rho_{n-1} \\ \rho_1 & 1 & \rho_2 & \cdots & \rho_{n-2} \\ \rho_2 & \rho_3 & 1 & \cdots & \rho_{n-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{n-1} & \rho_{n-2} & \rho_{n-3} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

- Auto correlação parcial

$$\Upsilon_k = P_k^{-1} \rho_k \quad (4.12)$$

$$\begin{bmatrix} \Upsilon_{k1} \\ \Upsilon_{k2} \\ \Upsilon_{k3} \\ \vdots \\ \Upsilon_{kk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_2 & \cdots & \rho_{k-1} \\ \rho_1 & 1 & \rho_2 & \cdots & \rho_{k-2} \\ \rho_2 & \rho_3 & 1 & \cdots & \rho_{k-3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{k-1} & \rho_{k-2} & \rho_{k-3} & \cdots & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \\ \vdots \\ \rho_k \end{bmatrix}$$

- Intervalo de confiança bilateral

$$IC = \mu \pm Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (4.13)$$

Onde: $\varsigma/2$ é o número relativo máximo de dados fora do intervalo de confiança, σ é o desvio padrão da amostra e Z se refere à tabela de distribuição normal bicaudal (Ver (MONTGOMERY; RUNGER; CALADO, 2000)).

- Correlação de Pearson

$$r = \frac{C_{X,Y}}{S_X S_Y} \quad (4.14)$$

Onde: $C_{X,Y}$ - covariância ou variância conjunta das variáveis X e Y ; S_X e S_Y - desvios padrões das variáveis X e Y , respectivamente; r - coeficiente de Pearson ($-1 \leq r \leq 1$)

- Autocorrelação sucessiva - Consiste no cálculo sucessivo da autocorrelação funcionando como uma espécie de filtro (MCGINN; JOHNSON, 1983; SHIMAMURA; NGUYEN, 2010):

$$\rho_k^{(n)} = \frac{E[(\rho_k^{(n-1)} - \bar{\rho}^{(n-1)})(\rho_k^{(n-1)} - \bar{\rho}^{(n-1)})]}{E[(\rho_k^{(n-1)} - \bar{\rho}^{(n-1)})^2]} \quad (4.15)$$

Onde: $\rho^{(n)}$ é a n -ésima função de autocorrelação (fac) e $\bar{\rho}^{(n)}$ sua média.

A Figura 4.2 ilustra esquematicamente o funcionamento da função de autocorrelação sucessiva:

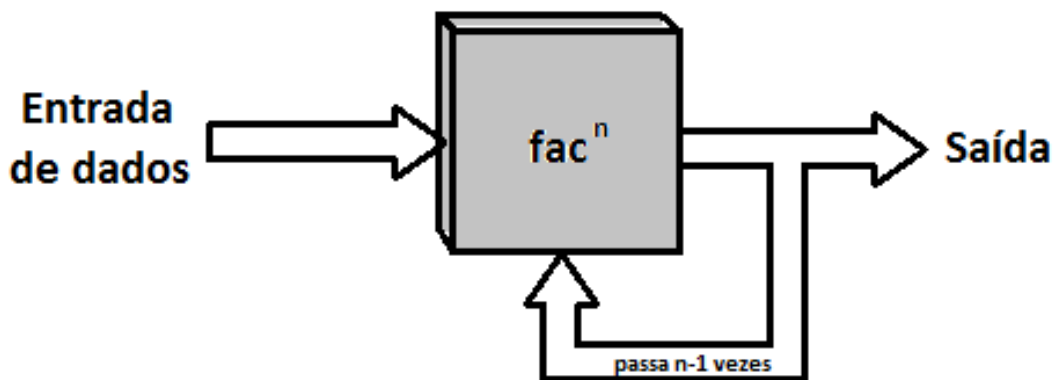


Figura 4.2: Esquema de funcionamento da função de autocorrelação sucessiva. Fonte: Autoria própria.

Na Figura 4.3 a seguir são mostradas as funções de autocorrelações das quatro primeiras ordens. Vê-se que na $fac^{(4)}$ a periodicidade e simetria ficam mais evidentes quando

comparadas com as anteriores. Em algumas situações é visualmente impossível perceber-se a periodicidade nas fac de menores ordens.

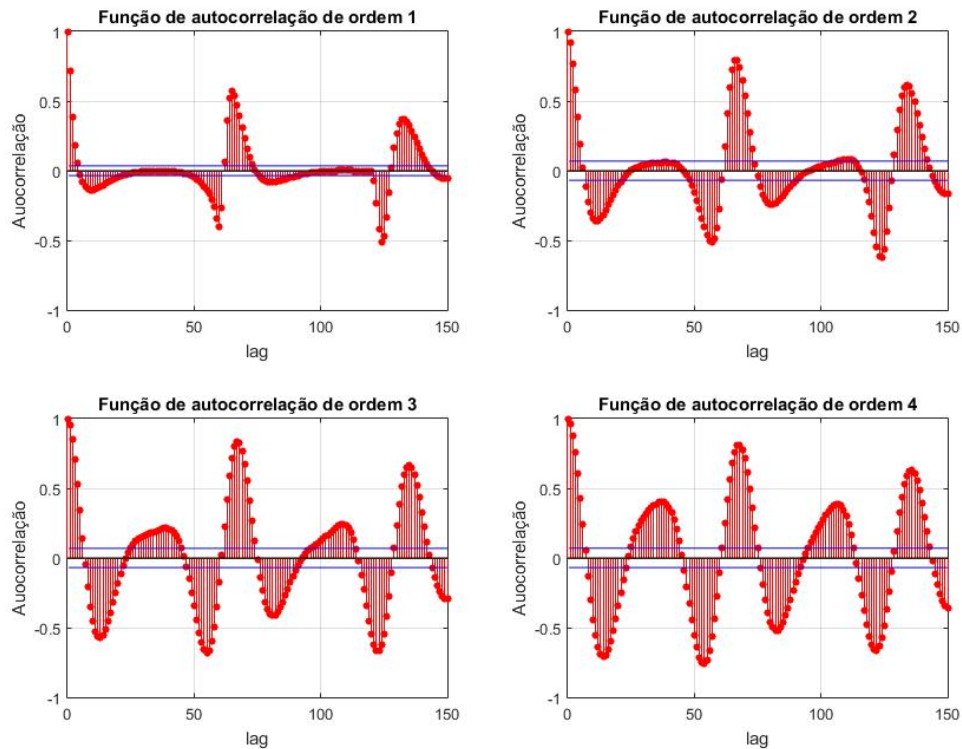


Figura 4.3: Comparação gráfica entre as fac de ordens 1 a 4. Fonte: Autoria própria.

4.2.2 Modelos de Séries Temporais

Uma série temporal é qualquer conjunto de observações ordenadas no tempo, onde cada valor tem a si atrelado um indicador do tempo onde esse valor ocorreu ou foi observado (VALINS, 2005). Segundo Morettin e Tolo (2006) uma série temporal é construída quando tem-se o interesse de:

- investigar o mecanismo gerador da série temporal;
- fazer previsões de valores futuros da série;
- descrever apenas o comportamento da série;
- procurar periodicidades relevantes nos dados.

Um modelo é uma descrição probabilística de uma série temporal.

Considerando o processo estocástico apresentado na Subseção 4.2.1, toma-se uma nova série temporal onde $\bar{X}_t = X_t - \mu$. Um modelo estocástico que pode ser extremamente útil na representação de certas séries é o modelo auto regressivo. Neste modelo, uma determinada observação é dada pelo somatório de observações anteriores com diferentes pesos. A Equação 4.16 mostra um processo autorregressivo $AR(p)$ de ordem p :

$$\bar{X}_t = \phi_1 \bar{X}_{t-1} + \phi_2 \bar{X}_{t-2} + \dots + \phi_p \bar{X}_{t-p} + a_t \quad (4.16)$$

Onde: ϕ_i ($i \leq p$) denota os parâmetros do processo auto regressivo e a_t um ruído branco.

Através do operador de retrocesso $B^m X_t = X_{t-m}$ ($m \leq p$) dado por $\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p$, a Equação 4.16 pode ser reescrita como mostrado na Equação 4.17:

$$\phi(B) \bar{X}_t = a_t \quad (4.17)$$

Outro modelo que tem grande importância em observações de séries temporais são os modelos de médias móveis, onde \bar{X}_t é linearmente dependente de um número finito q dos valores de a_t . Ao invés de tomar a observação mais recente como a previsão da próxima observação, toma-se uma média das últimas observações para filtrar o ruído e estimar com mais precisão a média local. A Equação 4.18 representa um modelo de médias móveis $MA(q)$:

$$\bar{X}_t = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (4.18)$$

Onde: θ_j ($j \leq p$) denota os parâmetros do processo de médias móveis, e a_t é o erro entre o valor real e o valor previsto pela média móvel.

$$a_i = \sum_{j=i}^{M+i-1} \frac{\bar{X}_j}{M} - \bar{X}_{M+i} \quad (4.19)$$

$$i = (1, 2, \dots, q) ; \quad M = N - q$$

Onde: q é o número de coeficientes de médias móveis utilizados, N é o tamanho da série temporal \bar{X} , M é o número de termos da ST utilizado nas médias móveis.

De forma similar, utiliza-se o operador de retrocesso $B^m a_t = a_{t-q}$ ($m \leq q$). Com isso:

$$\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q \quad (4.20)$$

e a Equação 4.18 pode ser reescrita como Equação 4.21:

$$\bar{X}_t = \theta(B)a_t \quad (4.21)$$

A união do modelo auto regressivo de ordem p com o modelo de médias móveis q às vezes pode beneficiar a montagem das séries temporais. Isso leva ao modelo auto regressivo de médias móveis $ARMA(p, q)$.

$$\bar{X}_t = \phi_1 \bar{X}_{t-1} + \dots + \phi_p \bar{X}_{t-p} + a_t - \theta_1 a_{t-1} - \dots - \theta_q a_{t-q} \quad (4.22)$$

Usando a notação B do operador de retrocesso, reescreve-se a Equação 4.22 que denota um processo auto regressivo e de médias móveis $ARMA(p, q)$:

$$\phi(B)X_t = \theta(B)a_t \quad (4.23)$$

Onde: $\phi(B)$ denota um polinômio de retrocesso de ordem p e $\theta(B)$ um polinômio de retrocesso de ordem q .

Muitas das vezes pode ser necessário realizar diferenciações na série antes de se buscar um modelo adequado. A Equação 4.25 traz o operador de diferenças utilizado:

$$\nabla X_t = X_t - X_{t-1} \quad (4.24)$$

$$\nabla^d X_t = (1 - B)^d X_t \quad (4.25)$$

Com a realização de d diferenciações em uma série, um modelo $ARMA(p, q)$ por exemplo, pode ser representado por $ARIMA(p, d, q)$. A inserção do número de diferenciações no modelo faz com que a representação seja dada por:

$$\phi(B) \nabla^d X_t = \theta(B)a_t \quad (4.26)$$

Outro fator importante em uma série temporal é a existência de sazonalidades. Para um processo $ARIMA$ sazonal tem-se $SARIMA$ com sazonalidade S , um polinômio AR sazonal $\Phi(B^s)$ de ordem P , um polinômio sazonal $\Theta(B^s)$ de ordem Q e um operador de diferenças sazonais de ordem D .

$$\nabla_S^D X_t = (1 - B)^D a_t \quad (4.27)$$

$$\nabla_S^D = (1 - B^{12})^D$$

Um modelo $SARIMA(p, d, q)(P, D, Q)_S$ é definido por

$$\Phi(B^s)\phi(B)\nabla^d\nabla_S^D X_t = \Theta(B^s)\theta(B)a_t \quad (4.28)$$

Para maiores esclarecimentos consultar (BOX; JENKINS; REINSEL, 2008; MONTGOMERY; JENNINGS; KULAHCI, 2015; YAFFEE; MCGEE, ; CLEVELAND et al., 1990; BRAGA, 2017).

4.2.3 Formas de Identificação de Modelos

O objetivo da identificação consiste em determinar os coeficientes do modelo além de estimativas preliminares dos parâmetros a serem usadas no estágio de estimação.

4.2.3.1 Análise da *fac* e *facp*

Uma das formas de estimativas preliminares é a análise gráfica da função de autocorrelação (*fac*) e autocorrelação parcial (*facp*).

A Tabela 4.1 mostra os procedimentos que possibilitam a estimativa dos parâmetros com base nas *fac* e *facp*.

Um dos maiores obstáculos à utilização das *fac* e *facp* para determinação de modelos está na identificação, onde para uma mesma série diferentes modelos podem ser identificados (MORETTIN; TOLOI, 2006). A seguir, são apresentadas outras propostas de identificação.

4.2.3.2 Critérios de Informação

Segundo Morettin e Toloi (2006), a partir da década de 70 foram propostas várias formas para identificação de modelos $ARMA$. Uma delas consiste em escolher os coeficientes k e l da Equação 4.29 de forma que esta seja minimizada:

$$P(k, l) = \ln(\hat{\sigma}_{k,l}^2) + (k + l)\frac{C(N)}{N} \quad (4.29)$$

Onde: $\hat{\sigma}_{k,l}^2$ é uma estimativa da variância residual obtida através do ajuste de $ARMA(k, l)$ das N observações da série, e $C(N)$ é uma função de dimensão N (MORETTIN; TOLOI, 2006).

A partir desta ideia de minimização da Equação 4.29, que é na verdade uma equação

Tabela 4.1: Comportamento Teórico dos modelos $AR(p)$, $MA(q)$, $ARMA(p, q)$, $SAR(P)$, $SMA(Q)$ e $SARMA(P, Q)$.

Modelos	Modelo em termo dos X_t 's anteriores $a_t =$	Modelo em termo dos a_t 's anteriores $X_t =$	$fac - \rho_k$	$facp - \Phi_{kk}$
$AR(p)$	$\phi(B)a_t$	$\phi^{-1}(B)a_t$	Infinita; exponencial amortecida e/ou senoide amortecida; sem anulação brusca	Finita; anulação brusca no lag k
$MA(q)$	$\theta^{-1}(B)X_t$	$\theta(B)a_t$	Finita; anula-se bruscamente no lag k	Infinita; predomina exponenciais amortecidas e/ou senoides; não se anula bruscamente
$ARMA(p, q)$	$\theta^{-1}(B)\phi(B)X_t$	$\phi^{-1}(B)\theta(B)a_t$	Infinita; exponenciais amortecidas e/ou senoides amortecidas para $k > p - q$; não se anulam bruscamente	Infinita; dominada por exponenciais e/ou senoides amortecidas para $k > p - q$; não se anulam bruscamente
$SAR(P)$	$\Phi(B^S)X_t$	$\Phi^{-1}(B^S)a_t$	Infinita; exponenciais amortecidas e/ou senoides amortecidas; não se anulam bruscamente	Finita; anula-se bruscamente no lag k
$SMA(P)$	$\Theta^{-1}(B^S)X_t$	$\Theta(B^S)a_t$	Finita; anula-se bruscamente no lag k	Infinita; exponenciais amortecidas e/ou senoides amortecidas; não se anulam bruscamente
$SARMA(P, Q)$	$\Theta^{-1}(B^S)\Phi(B^S)X_t$	$\Phi^{-1}(B^S)\Theta(B^S)a_t$	Infinita; exponenciais amortecidas e/ou senoides amortecidas em $k > Q - P$; não se anulam bruscamente	Infinita; dominada por exponenciais e/ou senoides amortecidas em $k > Q - P$; não se anulam bruscamente

(Fonte: (SOUZA; CAMARGO, 2004))

penalizadora para o número de coeficientes de $ARMA(k, l)$ e do tamanho N da amostra, são propostas diferentes equações penalizadoras e sua minimização. Akaike (1974), por exemplo, sugere um modelo e que este minimize o critério apresentado na Equação 4.30 através da escolha de k e de l .

$$AIC(k, d, l) = N \ln \hat{\sigma}_\alpha^2 + \frac{N}{N-d} 2(k+l+1+\delta_{d0}) + N \ln 2\pi + N \quad (4.30)$$

$$0 \leq k \leq K, 0 \leq l \leq L$$

$$K \text{ e } L = f(N), K = L = \ln(N)$$

Onde: $\hat{\sigma}_\alpha^2$ é o estimador de máxima verossimilhança de σ_α^2 , N é o número de observações da série e δ_{d0} é Delta de Kronecker.

Seja $\theta = (\phi, \theta, \sigma^2)$ o vetor dos parâmetros populacionais do processo $ARMA(p, q)$ descrito na Equação 4.23 e suponha que a distribuição da variável aleatória $X = (x_1, \dots, x_N)^T$

seja gaussiana. A função de verossimilhança é dado por:

$$\hat{\sigma}_\alpha^2 = L(\theta \mid x_1, \dots, x_N) = 2\pi^{-\frac{N}{2}} |\Gamma_N|^{-\frac{1}{2}} e^{\left(-\frac{1}{2}X^T\Gamma_N^{-1}X\right)} \quad (4.31)$$

Onde, Γ é a matriz de auto covariâncias e não singular

Hurvich e Tsai (1989) propõem uma correção para AIC a fim de melhorar seu comportamento no sentido de diminuir a probabilidade de selecionar uma ordem maior que a verdadeira. Esta correção é dada pela Equação 4.32 seguinte:

$$AIC_c(k) = AIC(k) + \frac{2(k+1)(k+2)}{N-k+2} \quad (4.32)$$

$$0 \leq k \leq K$$

$$K = f(N), \quad K = \ln(N)$$

Segundo Torres (2016), simulações mostram que esta correção é vantajosa quando o número de observações é pequeno ou quando a soma $p+q$ é uma fração "moderadamente grande" do tamanho da amostra.

Já Akaike (1977), Rissanen (1978), Schwarz et al. (1978) sugerem minimizar o Critério de Informação Bayesiana (BIC), dado pela Equação 4.33 a seguir:

$$BIC(k, l) = \ln \hat{\sigma}_{k,l}^2 + (k+l) \frac{\ln N}{N} \quad (4.33)$$

$$0 \leq k \leq K, 0 \leq l \leq L$$

$$K \text{ e } L = f(N), \quad K = L = \ln(N)$$

Em (HANNAN, 1980) e (HANNAN, 1982) mostra-se que, sob determinadas condições, as estimativas de p e q que minimizam a Equação 4.33 são fortemente consistentes. Entre um conjunto de modelos, vamos selecionar valores de p e q para o modelo ajustado que minimiza os valores de $AIC(p, q)$ e $BIC(p, q)$. Há uma evidência empírica de que o critério AIC está propenso para a escolher modelos super parametrizados enquanto o critério BIC tende a corrigir este problema.

4.2.4 Decomposição de séries temporais

Segundo Morettin e Toloi (2006), um modelo de decomposição consiste em escrever X_t como a soma de três componentes não observáveis, conforme Equação 4.34 para modelos

aditivos, e Equação 4.35 para modelos multiplicativos, mostrada a seguir:

$$X_t = T_t + S_t + a_t \quad (4.34)$$

$$X_t = T_t S_t a_t \quad (4.35)$$

Onde: T_t e S_t representam as partes tendenciosas e sazonais, respectivamente, e $a_t \sim N(0, \sigma_a^2)$ um ruído branco.

A Figura 4.2.4 ilustra a decomposição de um sinal nas três componentes mostradas na Equação 4.34. O comando utilizado para tal decomposição é o *decompose* no *software RStudio*®:

O principal interesse ao se considerar a série temporal sendo da forma conforme mostrada na Equações 4.34 e 4.35 é calcular uma estimativa \hat{S}_t para o valor de S_t e construir a série livre de sazonalidade. Esta série sazonalmente ajustada é da forma aditiva (Equação 4.36) ou multiplicativa (Equação 4.37) :

$$X_t^{Saz} = X_t - \hat{S}_t \quad (4.36)$$

$$X_t^{Saz} = \frac{X_t}{\hat{S}_t} \quad (4.37)$$

Em modelos aditivos, a variação sazonal parece constante, não mudando de valor conforme o valor da série também muda. Já em modelos multiplicativos, à medida que a série temporal aumenta em magnitude, a variação sazonal também aumenta.

Existe uma diferença na nomenclatura para diferenciar periodicidades regulares e irregulares. É dito que uma série temporal apresenta sazonalidade quando o período de repetição dos dados se dá de forma regular, ao passo que períodos irregulares são chamados de ciclos.

De acordo com Pierce (1979), há várias razões para considerar esta procedimento de ajuste sazonal. As componentes T_t e S_t são, em geral bastante relacionadas e a influência de uma componente sobre a outra pode ser muito forte devido ao fato de que métodos de estimação de S_t podem ser bastante afetados se T_t não for considerado, e a especificação de S_t depende da especificação de T_t .

Inicialmente, com relação à tendência, Morettin e Toloi (2006) descrevem três métodos para a estimação de T_t :

- ajustar uma função de tempo, como um polinômio, *IMA* exponencial ou outra função suave de t ;

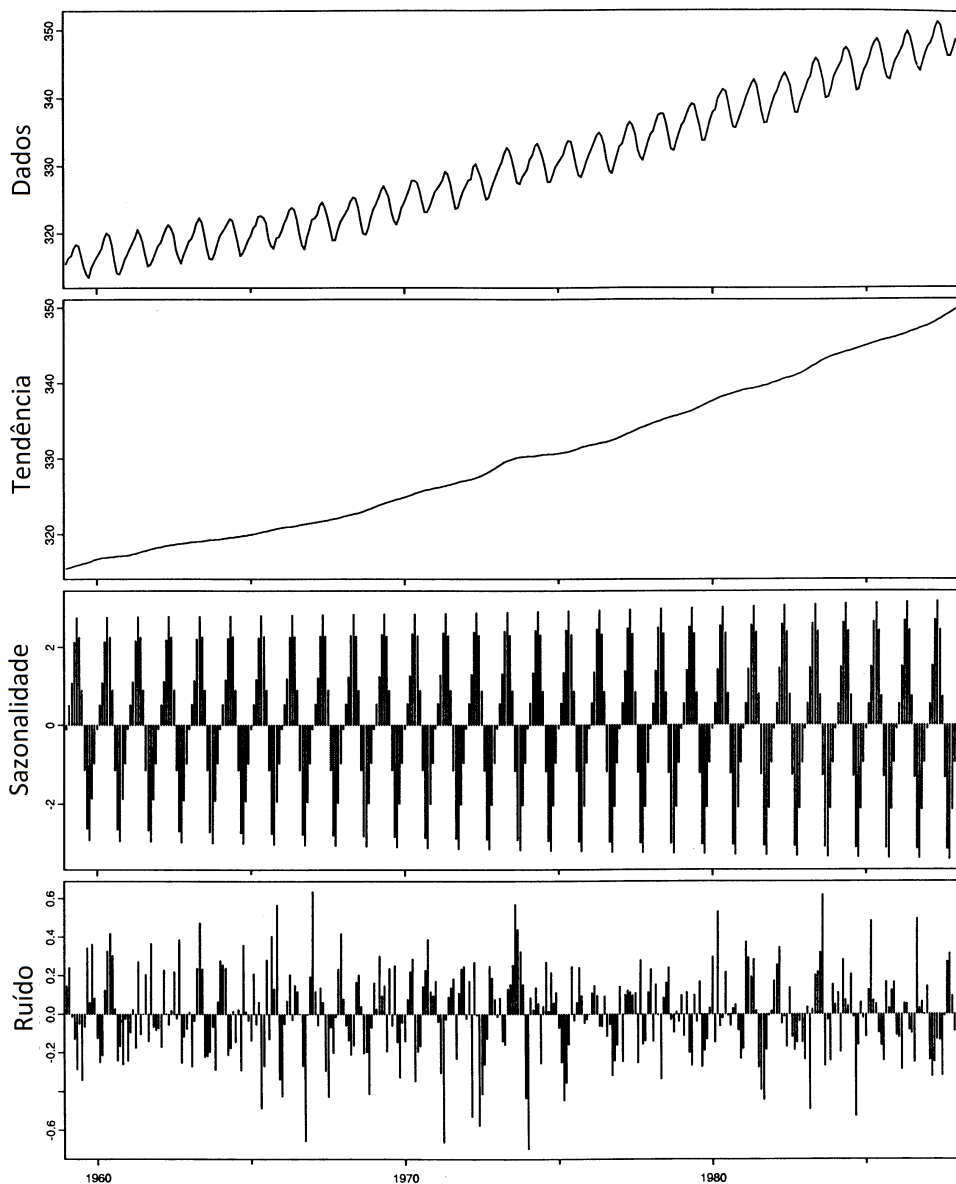


Figura 4.4: Série temporal decomposta em tendência, sazonalidade e ruído. Fonte: Adaptado de (FERREIRA(Org), 2018).

- suavizar os valores da série entorno de um ponto, a fim de estimar a tendência neste ponto;
- suavizar os valores da série através de sucessivos ajustes de retas de mínimos quadrados ponderados.

Realizada a estimativa \hat{T}_t , opta-se por utilizar a série ajustada para a tendência ou pela série livre da tendência, conforme mostrado nas Equação 4.38 para tendências aditiva

(Equação 4.38) ou para tendências multiplicativas (Equação 4.39) abaixo:

$$X_t^{Tend} = X_t - \hat{T}_t \quad (4.38)$$

$$X_t^{Tend} = \frac{X_t}{\hat{T}_t} \quad (4.39)$$

São diversos os testes que permitem verificar a existência de tendência em uma *ST*. Aqui é apresentado o teste de *Cox-Stuart* descrito em (COX; STUART, 1955) que considera pares de dados de X_t de forma que estes tenham equidistância igual à metade do número de dados da série. É então feita a diferença entre os membros de cada par e verifica-se o número de valores positivos e o número de valores negativos obtidos:

$$X_j^* = X_j - X_{j+N/2}, \quad j = (1, 2, \dots, N/2) \quad (4.40)$$

É então realizado o teste de hipótese:

$$H_0 : \mathbb{P}(X^* < 0) = \mathbb{P}(X^* > 0), \quad \forall j : \text{não existe tendência}$$

$$H_1 : \mathbb{P}(X^* < 0) \neq \mathbb{P}(X^* > 0), \quad \forall j : \text{não existe tendência}$$

Como o número de termos de X_t^* é maior que 20, é considerada uma distribuição normal para os dados (MORETTIN; TOLOI, 2006).

Já para a estimativa da sazonalidade faz-se a análise na alteração dos sinais dos *lags* obtidos a partir da *fac*. A Figura 4.5 mostra o comportamento da sazonalidade em uma série temporal à medida em que se altera o operador de retrocesso utilizado na representação da série.

Operador autorregressivo: (I) : $1 - 0,5B^S$, (II) : $1 - B^S$, (III) : $(1 - B)(1 - 0,5B^S)$, (IV) : $(1 - B)(1 - B^S)$, (V) : $(1 - 0,5B)(1 - B^S)$, (VI) : $(1 - B)(1 - B^S)^2$, (VII) : $(1 - B^2)(1 - B^S)$.

A dificuldade de se determinar a sazonalidade de uma série temporal está nos algoritmos que executam esta tarefa. Grande parte deles consiste em se estipular um valor de sazonalidade que se acredita ser próximo do valor real, e então são feitos testes para se verificar o quão próximo está este valor do real. Ou seja, é necessário ter-se, por algum meio, uma ideia do valor da sazonalidade.

Outra dificuldade encontrada é que os valores de períodos nas séries temporais aqui abordadas não são constantes, ou seja, ao invés de ter-se STs sazonais tem-se STs cíclicas. Além disso existe um amortecimento nas amplitudes das STs, tratando-se de ciclos amor-

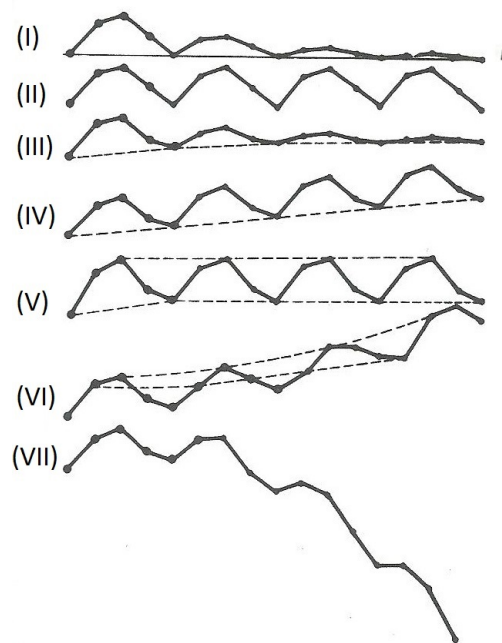


Figura 4.5: Comportamento da função sazonal para várias opções do operador sazonal geral autorregressivo. Fonte: Adaptado de (BOX; JENKINS; REINSEL, 2008).

tecidos, mostrados na Figura 4.5 por exemplo. O trabalho de Miller e Liberatore (1993) traz este tipo de abordagem. Porém, no presente são utilizados valores cíclicos médios.

4.3 Ondas Viajantes

Nesta seção é brevemente apresentada a Teoria das Ondas Viajantes devido a sua grande utilização e importância para compreensão dos sinais transitórios estudados neste trabalho. Sendo que sua aplicação é introduzida na Seção 2.2.

Os sinais transitórios de tensão em uma linha de transmissão são orientados segundo a Teoria das Ondas Viajantes. Nesta teoria, a mudança abrupta do nível de tensão em uma linha de transmissão se propaga por esta linha desde o ponto de origem da perturbação até as extremidades da linha, em ambos os sentidos. Ao encontrar uma descontinuidade no "percurso" estas ondas se dividem em ondas refletidas, e ondas refratadas. Este processo de reflexão e refração ocorre diversas vezes, até a total absorção da energia de onda pelos componentes da linha, atingindo o regime estacionário novamente (SOUZA, 2007).

O comportamento das ondas na linha depende da intensidade da onda, dos coeficientes de refração, reflexão e amortecimento e da velocidade de propagação. Estes por sua vez dependem da configuração da linha de transmissão, da resistência de falta e, por consequência, do tipo de falta. O ângulo de incidência do distúrbio nos sinais senoidais da

linha de transmissão também influenciam na atenuação ou expansão dos picos de tensão dos sinais de falta. Para que a *TOV* seja aplicável e os resultados do comportamento eletromagnético sejam condizentes com a realidade, é necessário que o modelo de linha considerado tenha seus parâmetros distribuídos, como por exemplo o modelo *JMARTI*, proposto por Marti (1982).

As ondas viajantes em uma *LT* sofrem três diferentes mudanças (VALINS, 2005):

- a amplitude sofre sucessivas atenuações;
- ocorrem suavização nas irregularidades existentes em um ciclo de onda para outro, de forma progressiva;
- ocorre similaridade das ondas de tensão e corrente.

As ondas viajantes são compostas pelo somatório de diversos sinais de frequências distintas. Cada sinal preserva sua frequência quando subdividido em ondas refletidas e ondas refratadas. Desta forma, os sinais com menor energia são mais rapidamente absorvidos pela linha de transmissão, restando os sinais com maior nível de energia. Por esta razão, as irregularidades existentes devido a esta variedade de frequências são atenuadas com o passar do tempo. Estas perdas de energia se devem às perdas por efeito Joule, efeito *skin*, efeito *corona*, perdas dielétricas e em isoladores (BEWLEY, 1963).

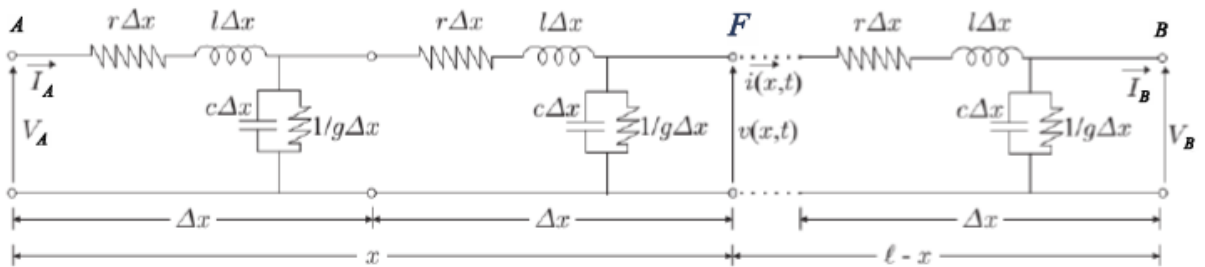


Figura 4.6: Modelo de linha de transmissão de parâmetros distribuídos considerando um ponto de curto-circuito. Fonte: (ALMEIDA, 2017 apud ZANETTA, 2003).

Realizando a análise do circuito da Figura 4.3, de forma similar à Subseção 3.1.4, tem-se:

$$-\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} = r \cdot i(x,t) + l \cdot \frac{\partial i(x,t)}{\partial x} \quad (4.41)$$

$$-\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} = g \cdot v(x,t) + c \cdot \frac{\partial v(x,t)}{\partial x} \quad (4.42)$$

A solução das Equações 4.41 e 4.42 resulta em expressões conhecidas como *equações telegráficas*, que governam o comportamento da tensão e da corrente, espaço e temporalmente (RAMO; WHINNERY; DUZER,).

$$\frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x^2} = rg \cdot v(x, t) + (rc + lg) \cdot \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} + lc \cdot \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} \quad (4.43)$$

$$\frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial x^2} = rg \cdot i(x, t) + (rc + lg) \cdot \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} + lc \cdot \frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial t^2} \quad (4.44)$$

Ao se desconsiderar as perdas resistivas, ou seja, para $r = g = 0$, as Equações 4.43 e 4.44 podem ser expressas como mostrada abaixo, sendo conhecidas como equações de onda de tensão e corrente.

$$\frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x^2} = lc \cdot \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} \quad (4.45)$$

$$\frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial x^2} = lc \cdot \frac{\partial^2 i(x, t)}{\partial t^2} \quad (4.46)$$

A solução das Equações 4.45 e 4.46 pode ser simplificada conforme as Equações 4.47 e 4.48

$$v(x, t) = f_1 \left(t - \frac{x}{v_p} \right) + f_2 \left(t + \frac{x}{v_p} \right) \quad (4.47)$$

$$i(x, t) = \frac{1}{Z_c} \left[f_1 \left(t - \frac{x}{v_p} \right) + f_2 \left(t + \frac{x}{v_p} \right) \right] \quad (4.48)$$

Onde: $Z_c = \sqrt{\frac{1}{c}}$ é a impedância característica e $v_p = \sqrt{\frac{1}{lc}}$ é a velocidade de propagação das ondas, para uma *LT* sem perdas.

A Figura 4.3 traz uma interpretação geométrica para as funções f_1 e f_2 , que são ondas eletromagnéticas que se propagam pela linha de transmissão em sentidos opostos. Aqui adota-se a propagação no sentido *AB* (sentido positivo de x) para f_1 e o sentido oposto *BA* (sentido negativo de x) para f_2 .

Devido ao fato de que as variações nos sinais de tensão e corrente se propagarem do ponto F em forma de ondas eletromagnéticas, essas não são percebidas instantaneamente nos terminais de monitoramento da linha de transmissão. Assim, para *LT* longas, faz-se necessário utilizar modelos com parâmetros distribuídos para contemplar tais características (ALMEIDA, 2017).

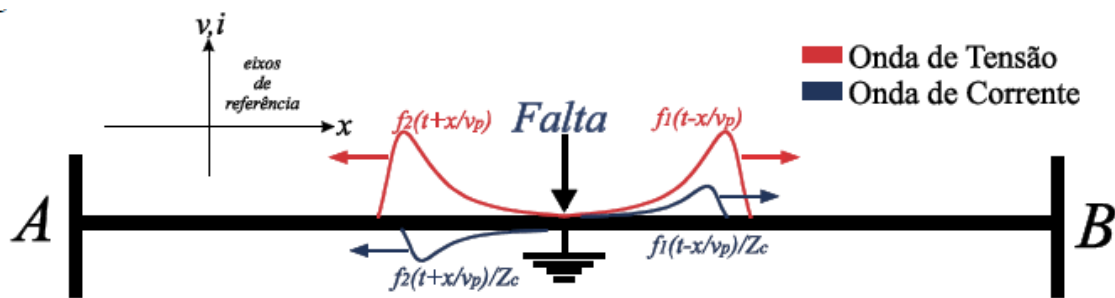


Figura 4.7: Ondas progressivas e regressivas. Fonte: (ALVES, 2015).

Em situações onde existem muitas ramificações nas linhas de transmissão, com várias linhas interligadas, ou onde ocorrem reflexões das ondas propagadas, as soluções descritas conforme descritos acima se tornam custosas e acumulam um grande número de termos. Torna-se difícil, nessas circunstâncias, equacionar no tempo as diversas fontes de ondas viajantes ou verificar em quais pontos no tempo e em quais posições nas ondas das linhas coincidirão aditivamente para produzir grandes tensões. Enfim, é difícil fazer qualquer análise devido ao grande número de variáveis envolvidas. Uma forma bastante eficiente de ilustrar o comportamento das ondas viajantes é através do *diagrama de Lattice*, conforme proposto por Bewley (1963 apud BARNETT, 1974).

Para a construção do *diagrama de Lattice*, considera-se a Figura 4.8. Inicialmente, marca-se sobre um segmento de reta horizontal os pontos de junção A , F e B na linha de transmissão. Estes são posicionados em intervalos iguais aos tempos de propagação das ondas em cada trecho da linha. Uma escala de tempo vertical adequada é então escolhida. O posicionamento dos pontos de junção são posicionados desta forma, ao invés de posicioná-los de acordo com os comprimentos reais da linha, pois assim todos os segmentos de reta terão o mesmo coeficiente de inclinação, independentemente das diferentes propriedades da linha. As frentes de ondas viajantes são então desenhadas no diagrama. Na Figura 4.8 vê-se o resultado obtido. Nesta figura é ainda ilustrado os coeficientes de atenuação das ondas refletidas e refratadas para os diferentes trechos da linha de transmissão.

Nesta figura têm-se:

- h são os fatores de reflexão para ondas se propagando para a esquerda e para a direita;
- e são os fatores de refração para ondas se propagando para a esquerda e para a direita.

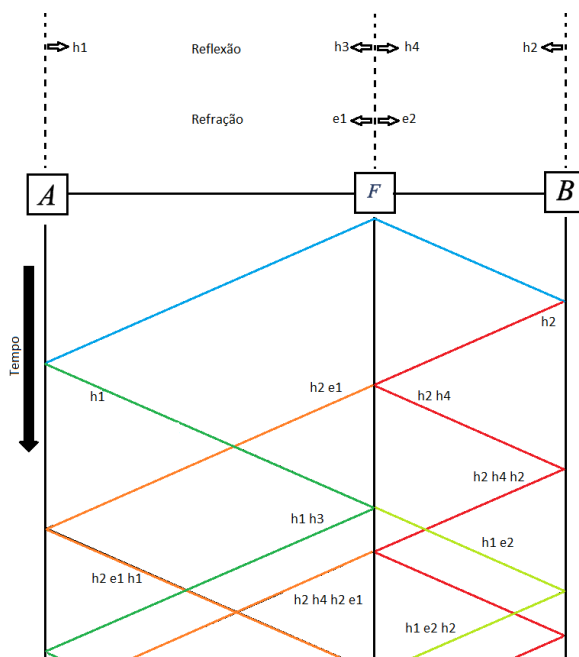


Figura 4.8: Diagrama de Lattice para o circuito analisado. Fonte: Adaptado de (ALMEIDA, 2017).

Para a determinação da localização geográfica do ponto de ocorrência do distúrbio na linha de transmissão são cronometrados os tempos de ocorrências de pontos de máximo na tensão monitorada (cristas de onda) em um terminal da *LT*. No caso de faltas aterradas como, por exemplo, monofásicas, as ondas refletidas no terminal remoto e refratadas no ponto de falta não podem ser mais desprezadas e duas condições devem ser consideradas: faltas localizadas na primeira e na segunda metade da linha (SOUZA et al., 2015).

Uma vez determinados os tempos, utiliza-se a Equação 4.49 para faltas localizadas na primeira metade da linha, ou a Equação 4.50 para faltas localizadas na segunda metade da linha.

$$d = \frac{t_2 - t_1}{2}v \quad (4.49)$$

$$d = l - \frac{t_3 - t_1}{2}v \quad (4.50)$$

Onde: d é a distância entre o terminal de monitoramento e o ponto de ocorrência da falta, t_1 é o tempo decorrido entre o início da cronometragem e a chegada da primeira frente de onda ao terminal de monitoramento, t_2 é o tempo decorrido entre o início da cronometragem e a chegada da segunda frente de onda ao terminal de monitoramento, t_3 é o tempo decorrido entre o início da cronometragem e a chegada da primeira frente de onda refratada ao terminal de monitoramento, $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ é a velocidade de propagação da

onda na linha (aproximado pela velocidade de ondas no vácuo).

Observa-se na Figura 4.8 que os coeficientes de inclinação das retas são nada mais que o módulo do inverso da velocidade v de propagação das ondas na linha. Como v é previamente conhecido, determinar a distância d consiste simplesmente em monitorar os tempos de ida e de volta das cristas de onda. No entanto, em determinadas situações esta tarefa não é trivial, necessitando, como mostrado no Capítulo 2, do prévio uso de filtros de frequências, análises espectrais, etc.

Capítulo 5

Metodologia

Neste capítulo é exposta a forma como são realizadas as simulações computacionais nas linhas de transmissão, bem como os métodos matemáticos que são utilizados posteriormente para tratamento de dados e extrações de características. Na Seção 5.1 são apresentadas as configurações utilizadas no *software ATPDraw*[®] para as simulações dos dados de faltas. Na Seção 5.2 são mostradas as considerações feitas com relação aos dados simulados, a forma como os testes de tendência e sazonalidade são realizados. Na Seção 5.3 são mostradas as normas utilizadas para as comparações de resultados possibilitando mensurar a eficácia do métodos de localização de faltas existentes e o do método proposto.

5.1 Simulação dos dados

Para a geração de um banco de dados de faltas é utilizado o *software ATPDraw*[®]. Neste programa é implementada uma linha de transmissão aérea em *CA*, trifásica de $500kV$ de tensão entre fases e $60Hz$ de frequência. A extensão da LT é de $200km$, perfeitamente transposta, modelada a partir de *JMARTI* (MARTI, 1982). A Figura 5.1 mostra o diagrama unifilar do sistema de transmissão.

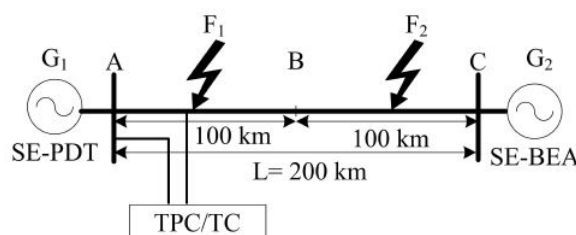


Figura 5.1: Diagrama unifilar das LTs implementadas. Fonte: (ALMEIDA, 2017).

A Figura 5.2 traz a modelagem do sistema de transmissão usando *software ATP-Draw*[®].

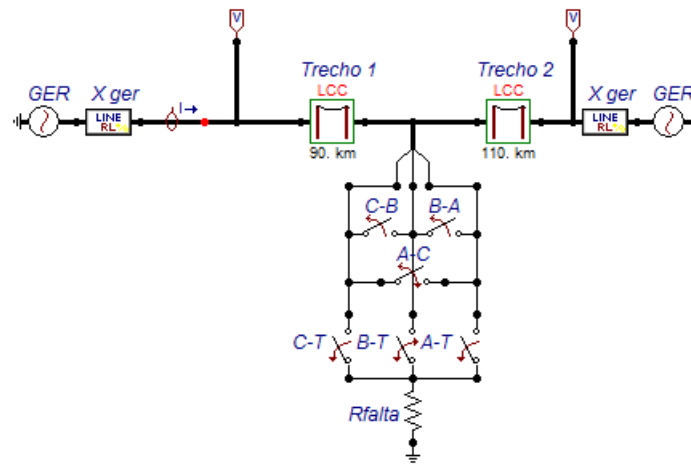


Figura 5.2: Diagrama unifilar das LTs implementadas. Fonte: Autoria própria.

A Tabela 5.1 mostra as características dos cabos de fase e para-raios utilizados na linha simulada.

Tabela 5.1: Medidas relacionadas aos condutores fase e para-raios utilizados.

Condutor	Fase - Grosbeak (mm)	SPDA - 3/8"
Raio Interno	4,63	0
Raio Externo	12,57	4,57
Resistência DC $\Omega/km \cdot 10^{-2}$	8,99	4,19
Flexa a meio vão (m)	12,00	7,00

(Fonte: Autoria própria.)

A Figura 5.3 mostra as características das torres. Torres alto portantes do tipo piramidal (GONTIJO, 2010; AMARAL et al., 2015).

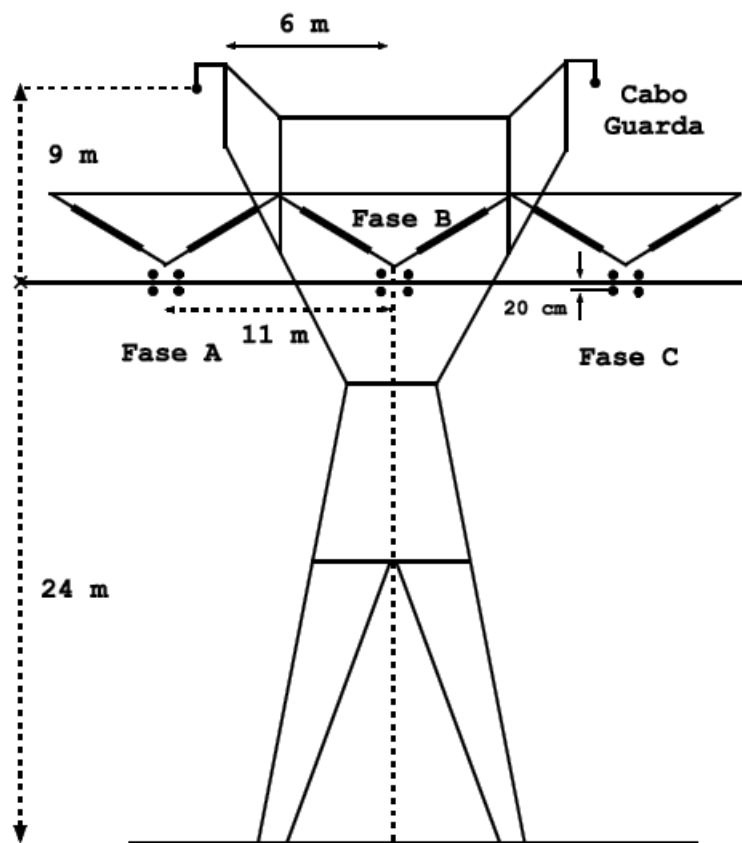


Figura 5.3: Topologia da torre utilizada (Linha 1). Fonte: (ALVES, 2015).

Em (FONSECA; LEAL, 2003; CANTANHEDA, 2014a; CANTANHEDA, 2014b; ALVES, 2015) são mostradas descrições detalhadas dos procedimentos de inserção dos parâmetros de linha para sua implementação em *ATPDraw*[®] bem como resultados de simulações.

Os sinais de tensão de faltas gerados pelo *ATPDraw*[®] dependem de diversos fatores como já mencionado na Seção 4.3. Além das características da linha de transmissão no instante de início da falta, a frequência de amostragem dos relés de monitoramento (apresentados na Seção 3.2) também são relevantes uma vez que influenciam no número de dados analisados nas séries temporais em um mesmo intervalo de tempo. Estes fatores são apresentados na Tabela 5.2 de forma mais detalhada e quantificada para as simulações realizadas.

Para a identificação dos vetores de tensão é utilizada uma nomenclatura que permita associar cada vetor às situações de faltas mostradas anteriormente na Tabela 5.2. A importância deste padrão de nomes está na necessidade de conversão dos formatos dos arquivos e na automatização dos algoritmos utilizados. Um dos formatos de arquivo gerado pelo *ATPDraw*[®] é ".MAT", aberto no *MATLAB*. Porém, como as ferramentas de

Tabela 5.2: Configurações das simulações realizadas.

Linha de Transmissão	Tipo de Falta	Elementos Envolvidos	Distância de Falta (km)	Ângulo de Incidência ($^{\circ}$)	Frequência de Amostragem (kHz)	Número de Simulações
Linha 1	Bifásica	$\hat{A} - \hat{B}$	5 : 5 : 30 40 : 10 : 100 120 : 20 : 180 190	0 : 30 : 330	100	72 84 60
Linha 1	Trifásica	$\hat{A} - \hat{B} - \hat{C}$	5 : 5 : 30 40 : 10 : 100 120 : 20 : 180 190	0 : 30 : 330	100	72 84 60
Linha 1	Bifásica	$\hat{A} - \hat{B}$	5 10 20 45 70 84 155	0 : 45 : 315	200	24 16 16
Linha 2	Bifásica	$\hat{A} - \hat{B}$	10 45 84 155	0 : 45 : 315	200	32
Total de Simulações						550

(Fonte: Autoria própria.)

análises estatísticas utilizadas estão presentes no *RStudio*[®] é necessário a conversão dos arquivos ".MAT" em arquivos ".CSV", formato compatível tanto com *LibreOffice Calc*^{®1} quanto com o próprio *RStudio*[®].

A nomenclatura dos vetores segue o padrão apresentado a seguir:

'Elementos Envolvidos' 'Distância de Falta' km 'Ângulo de Incidência' gr 'Resistência' ohm 'Frequência de Amostragem' kHz.MAT

Exemplo de nome de vetor para uma falta bifásica entre as fases $\hat{A} - \hat{B}$ (AB) a $10Km$ ($10km$) deste terminal. Com ângulo de incidência de 30° ($30gr$), resistência de 20Ω ($20ohm$) e frequência de amostragem de $100kHz$ ($100kHz$):

AB10km30gr20ohm100kHz.MAT

Com relação ao tempo de simulação no *ATPDraw*[®], é simulado apenas o ciclo de senoide onde se encontra o sinal de distúrbio, ou seja o tempo de $1/60Hz$ ($16,67ms$). Para as frequências de amostragem consideradas, $100kHz$ e $200kHz$, tem-se portanto vetores de dimensões 1667 e 3334, respectivamente.

É utilizado ainda para comparação de resultados o banco de dados de (ALMEIDA, 2017). A LT simulada nesse trabalho se difere nas dimensões e posicionamentos dos cabos de transmissão e proteção. As características de tensão de fase, frequência, comprimento, e modelo para geração de distúrbios são os mesmos. O objetivo de se analisar dados de tensão de dois circuitos é verificar as diferenças e semelhanças entre o comportamento dos diversos coeficientes calculados conforme as distâncias de ocorrências das faltas são modificadas. As constantes de atenuação e de fase, por exemplo, embora não sejam aqui

¹Copyright 2000-2017

calculadas, assumem diferentes valores em circuitos distintos.

Para diferenciação a *LT* implementada e simulada nesta pesquisa é denominada Linha 1, já a *LT* implementada e simulada em (ALMEIDA, 2017) é denominada Linha 2.

5.2 Tratamento dos Dados

O sinal de tensão registrado pelo relé de monitoramento contém todas as informações de tensão presentes na linha, desde a tensão característica desta linha (com a frequência de $60Hz$), às componentes harmônicas nela presentes. O número de dados coletados por este relé depende das características de seus componentes, conforme mencionado no Capítulo 3. Porém, de forma geral, devido ao fato dos sinais transitórios que trafegam na *LT* se sobreporem ao sinal senoidal próprio desta linha, estes transitórios se moldam à esta senoide desde seu surgimento até seu fim. Sendo que a extinção do sinal transitório é devido ao amortecimento próprio da linha. A Figura 5.4 ilustra esta tendência para uma situação específica de falta, mas isto se aplica a todas as outras situações de faltas, independente do tipo de falta ou do ângulo de incidência do sinal transitório. O que ocorre é uma adição de todos os sinais injetados na *LT*.

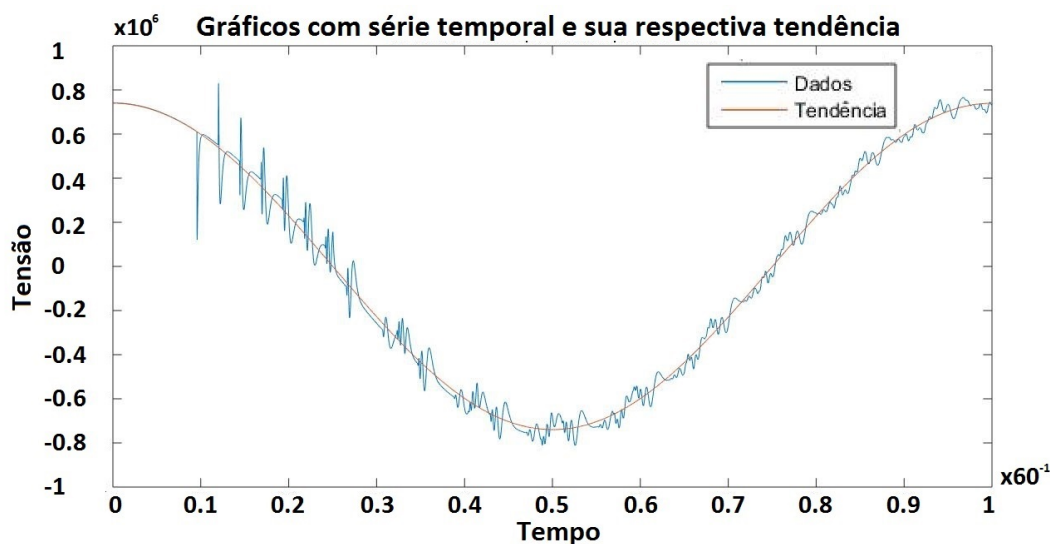


Figura 5.4: Série temporal e sua tendência. Fonte: Autoria própria.

Devido ao fato do objeto de estudo ser exclusivamente o sinal transitório, e apenas estes serem resultados das condições de falta da linha de transmissão, as senoides de $60Hz$ presentes nos dados oscilográficos se tornam dispensáveis à análise. Para a constatação estatística desta componente faz-se o teste de *Cox-Stuart* descrito por Cox e Stuart (1955). Para utilização deste teste, faz-se a série temporal X_t conforme a Equação 5.1:

$$X_t = V(\hat{t}) \quad (5.1)$$

$$\hat{t} = \left[\frac{n}{60}, \frac{n+1}{60} \right] \quad \therefore n = (1, 2, \dots), t = (1, 2, \dots, N)$$

Onde: $V(\hat{t})$ corresponde à tensão instantânea da linha ($60Hz$) e os valores de tempo \hat{t} variam em um intervalo de ciclo da senoide de $60Hz$. Com esta condição, parte-se do princípio de que já se tem o prévio conhecimento da existência de um distúrbio na LT dentro do ciclo senoidal n considerado. Este monitoramento pode ser feito através da medida do instante de ocorrência de uma queda considerável no nível de tensão da linha e uma elevação no nível de corrente.

Conforme mostrado anteriormente, é comprovada a existência de tendência nos dados de tensão. Portanto, é possível decompor a série de tensão em uma soma da série com tendência T e da série correspondente ao distúrbio de tensão T^{Tend} , Equação 5.2

$$X_t = T_t + T_t^{Tend}, \quad t = (1, 2, \dots, N) \quad (5.2)$$

A tendência apresentada em X , conforme mencionado, se deve ao sinal de tensão da linha de transmissão com sua frequência nominal. Sendo esta tensão um ciclo de um sinal periódico, as séries de Fourier apresentam as características matemáticas de melhor representar funções periódicas, sejam estas contínuas ou discretas.

A Equação 5.3 é utilizada para dados relacionados a uma periodicidade (BLOOMFIELD, 2004) (SOUZA; CHRISTO; ALMEIDA, 2017d) e é utilizada para uma aproximação da parte tendenciosa de X , $T \cong \hat{T}$.

$$\hat{T}_t = \mu + A \cos\left(\frac{\omega t}{N}\right) + B \text{sen}\left(\frac{\omega t}{N}\right) + a_t \quad (5.3)$$

$$A = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N X_t \cos(\omega t), \quad B = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N X_t \text{sen}(\omega t), \quad \mu = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N X_t$$

Onde $\omega = 2\pi k/N$, N é o tamanho da amostra e corresponde ao número de dados coletados pelo relé de monitoramento durante $\frac{1}{60}s$. Ou seja, $N = \frac{\text{frequencia}_{relé}}{60}$. Para esta situação, o número de ciclos K é igual a 1.

Com as Equações 5.2 e 5.3:

$$X_t^{Tend} = X_t - \hat{T}_t; \quad t = [1, N] \quad (5.4)$$

Uma outra consideração que pode ser feita é tomar a série X^{Tend} apenas a partir do ponto de início do distúrbio, uma vez que os dados anteriores a este ponto têm apenas uma ligeira variação em torno de seu valor médio. Nomeando o ponto inicial da falta como sendo l , a série temporal que efetivamente consiste no distúrbio como F e ξ sendo a série temporal pré falta:

$$X_t^{Tend} = \xi_{t1} + F_{t2} \quad (5.5)$$

$$t = [1, N] ; t1 = [1, l - 1] ; t2 = [l, N]$$

A consequência da extração da tendência do sinal é ilustrada na Figura 5.5:

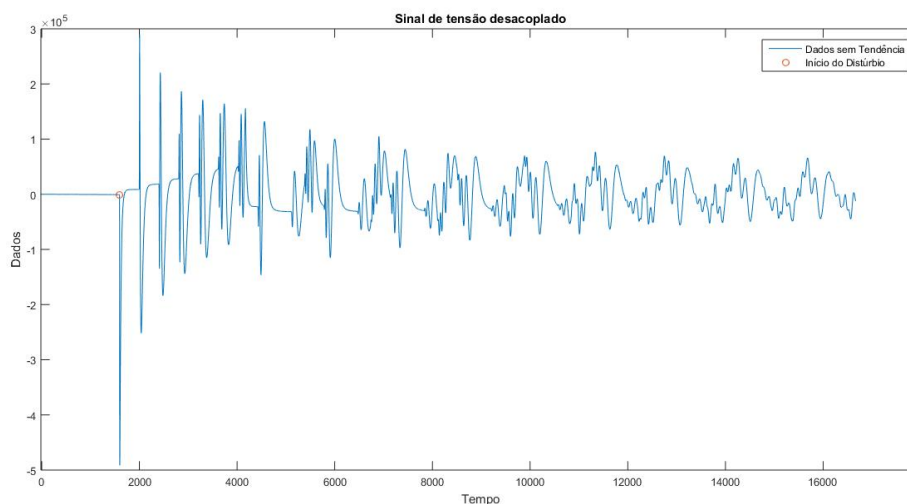


Figura 5.5: Sinal de tensão desacoplado. Fonte: Autoria própria.

O valor de l pode ser determinado por meio de uma diferenciação em X^{Tend} e tomando l como sendo o primeiro valor fora de um intervalo de confiança centrado em X_1^{Tend} pré estabelecido, conforme Algoritmo 1 baseado em (CAVALCANTE, 2011). A diferenciação em X^{Tend} é nada mais que a medida do valor de queda do nível de tensão na LT. Sendo este pré definido como normal para valores abaixo de uma tolerância tol pré estabelecida.

O ponto de início da falta é comum a todas as fases nela envolvida, o que difere são os ângulos de incidência, defasados de 120° para cada fases.

A série resultante da extração da senoide de $60Hz$ e dos dados pré-falta F , resultam na série temporal de natureza totalmente relacionada ao distúrbio. Sendo assim têm-se nesta série uma componente periódico relacionado ao movimento oscilatório das ondas viajantes na linha de transmissão. Esta periodicidade por sua vez está relacionada ao tempo de

Algoritmo 1 Início de Distúrbio

```

1:  $N \leftarrow \text{dimensão}(\hat{T})$ 
2: para  $F \leftarrow 1$  até 3 faça ▷ ( $1 = \hat{A}$ ,  $2 = \hat{B}$ ,  $3 = \hat{C}$ )
3:   para  $i \leftarrow 1$  até  $(N-1)$  faça
4:      $X_F^{Tend*}(i) \leftarrow \text{abs}(X_F^{Tend}(i+1) - X_F^{Tend}(i))$ 
5:     se  $m == 0$  &  $X_F^{Tend*}(i) > \text{tol}$  então
6:        $m \leftarrow m + 1$ 
7:       retorna  $l = i$  ▷ Valor de  $l$ 
8:       retorna  $\nu_F = (l + 1)\frac{360^\circ}{N} + (F - 1)120^\circ$  ▷ Ângulo de incidência para a fase
       $F$ 
9:   fim se
10: fim para
11: fim para

```

viajem de cada frente de onda entre o ponto de origem da falta e os terminais da linha considerada. Para a análise do comportamento cíclico ao invés de se usar diretamente a série utiliza-se sua *fac*, pois esta evidencia melhor os padrões presentes nos dados analisados.

A função de autocorrelação é uma medida da regularidade de uma função. Mais especificamente, é uma medida da similaridade de um sinal e de sua versão atrasada no tempo. A *fac*, algumas vezes, é usada para diferenciar uma informação desejada de um ruído (SHIMAMURA; NGUYEN, 2010). Este processo de cálculo da *fac* é feita de forma sucessiva. Experimentalmente verificou-se que a *fac*⁽⁴⁾ (Equação 4.15) é suficiente para ter-se dados com periodicidades bem definidas, caracterizados por senoides amortecidas.

Para o ajuste de uma série considerando sua componente sazonal utiliza-se o modelo descrito na Equação 4.34. Com isto, o ajuste sazonal consiste em obter as estimativas \hat{S}_t de S_t e calcular $X_t^{SA} = X_t - \hat{S}_t$, para modelos aditivos, ou calcular $X_t^{SA} = \frac{X_t}{\hat{S}_t}$ para modelos multiplicativos.

A Figura 5.6 ilustra um exemplo de *fac* para o gráfico mostrado anteriormente na Figura 5.5. Observado os *lags* é possível notar seu comportamento senoidal amortecido, sendo que o padrão de repetição média dos ciclos da senoide caracteriza a periodicidade da ST.

Para a determinação desta periodicidade é utilizado um algoritmo simples (Algoritmo 1) que leva em consideração a mudança dos sinais de positivo para negativo, e vice-versa, dos valores de autocorrelação. Observa-se que *lag's* fora do intervalo de confiança de 95% adotado são considerados como nulos.

Tomando X_ρ como sendo uma ST composta pelos valores de autocorrelação da sé-

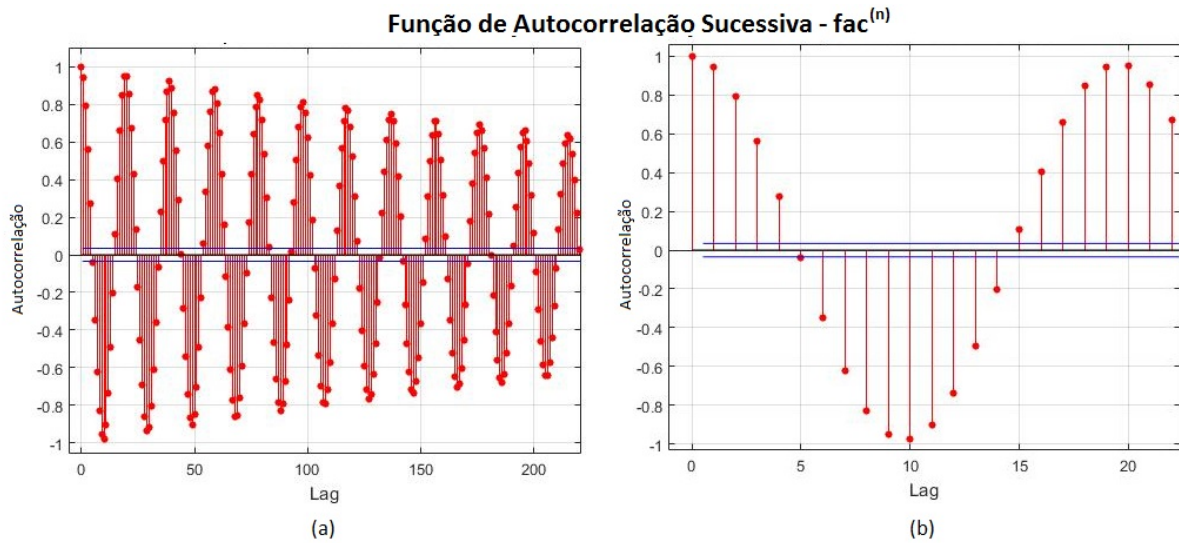


Figura 5.6: (a) Gráfico da $fac^{(4)}$ com 220 lags referente ao gráfico mostrado na Figura 5.5. (b) Destaque para o primeiro ciclo. Fonte: Autoria própria.

rie X^{Tend} , o procedimento adotado para a determinação da periodicidade é descrito no Algoritmo 2 a seguir:

Algoritmo 2 Valor de periodicidade na fac .

```

1:  $N \leftarrow \text{dimensão}(X_\rho)$ 
2:  $m \leftarrow 0, n \leftarrow 0$ 
3: para  $i \leftarrow 1$  até  $(N-1)$  faça
4:   se  $X_\rho(i) < IC_{95\%}$  &  $X_\rho(i+1) > IC_{95\%}$  então
5:      $m \leftarrow m + 1$ 
6:      $p_1(m) \leftarrow i + 1$ 
7:   fim se
8: fim para
9: para  $i \leftarrow 1$  até  $(N-1)$  faça
10:  se  $X_\rho(m+i) > IC_{95\%}$  &  $X_\rho(m+i+1) < IC_{95\%}$  então
11:     $n \leftarrow n + 1$ 
12:     $p_2(n) \leftarrow i$ 
13:  fim se
14: fim para
15:  $p(1) = [p_1(1) \ p_2(1)]$ 
16: para  $i \leftarrow 2$  até  $n$  faça
17:   $p(i) = [p_1(i) \ p_2(i)]$ 
18:   $periodorel(i) \leftarrow \max \langle X_\rho(p(i)) \rangle - \max \langle X_\rho(p(i-1)) \rangle$ 
19: fim para
20:  $periodo = med(periodorel)$ 

```

Outra abordagem consiste na utilização da transformada rápida de Fourier, exposta na Subseção 4.1.2, para determinação da periodicidade presente na função de auto cova-

riância ($facv$). O procedimento consiste na determinação da $facv$, e então a realização da transformada de Fourier. Em seguida determina-se a amplitude de maior magnitude. A esta amplitude está atrelado um determinado valor de frequência, denominado frequência dominante. Esta frequência quando tomada seu inverso consiste no valor de período de tempo da senoide que domina $facv$ analisada.

A análise da relação entre frequência e amplitude de um sinal é denominada análise espectral. A transformada passa os dados antes no domínio do tempo para o domínio da frequência. Quando se faz a transformada de Fourier da função de auto covariância, tem-se a densidade espectral de potência, detalhada em (ALHASSID; FYODOROV, 1998, pp. 9579) e (MORETTIN; TOLOI, 2006, pp. 435–476).

Para a determinação das distâncias de falta a partir das periodicidades anteriormente calculadas utiliza-se regressão linear através de mínimos quadrados já mostrados na Subsessão 4.1.1, onde x_i representa os ciclos e y_i as distâncias. Apesar de algumas situações a relação $distância \times ciclo$ não seguir o padrão esperado, na grande maioria dos casos é possível representar esta relação por meio da equação polinomial. Este equacionamento torna possível calcular a distância de determinada situação de falta apenas com a informação da periodicidade calculada para esta falta.

Situações atípicas ocorrem quando o sinal gerado pela falta é muito distorcido, fugindo do padrão apresentado pelos demais casos. Porém, isso não torna o uso da análise da periodicidade da fac inviável em situações reais de localização de faltas.

A Figura 5.7 mostra o passo-a-passo para utilização do método proposto neste trabalho. Inicialmente é utilizado um banco de dados de situações diversas de faltas para a geração de um polinômio que tenha como variável independente os valores de periodicidade e variável dependente os valores de distâncias de faltas. Calculado este polinômio, em uma situação de falta qualquer, basta que se calcule a periodicidade dos dados desta falta, por meio dos passos 2 até 4, e atribuir à variável independente no polinômio já calculado, o valor da periodicidade. Como saída ter-se-á o valor de distância relacionado à falta.

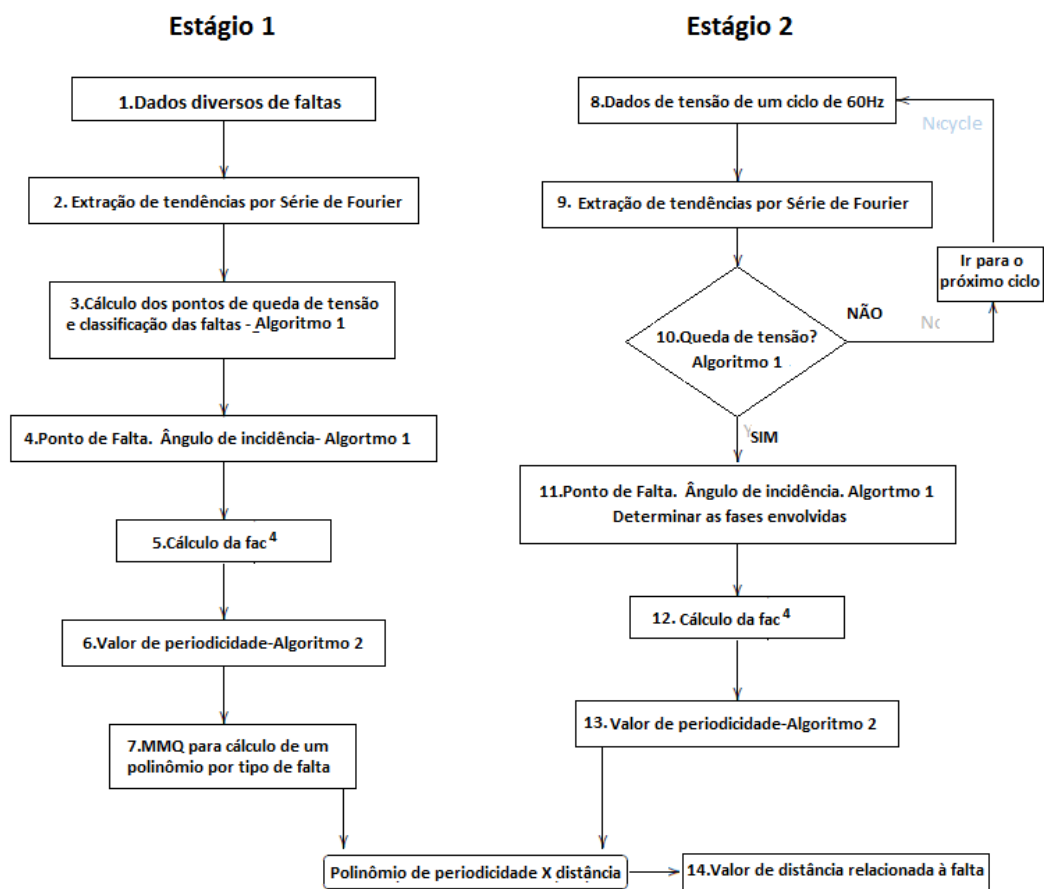


Figura 5.7: Fluxograma da metodologia utilizada para localização de faltas. Fonte: Autoria própria.

5.3 Comparação dos resultados

Para verificação da eficiência do método de localização de faltas proposto neste trabalho são feitas comparações com os valores de distâncias obtidos com o referido método, e valores de distâncias obtidos através do uso da TOV. As comparações são feitas através dos cálculos de erro absoluto (Equação 5.6), erro relativo (Equação 5.7) e erro médio (Equação 5.8).

$$e_{abs\ i} = |valor_{real\ i} - valor_{calculado\ i}| \quad (5.6)$$

$$e_{rel\ i} = \frac{e_{abs\ i}}{valor_{real\ i}} \quad (5.7)$$

$$e_{med} = \frac{\sum_{i=1}^N e_{rel\ i}}{N} \quad (5.8)$$

Onde: $e_{abs\ i}$ é o erro absoluto e $e_{rel\ i}$ é o erro relativo entre o valor real de distância $valor_{real\ i}$ e o valor de distância calculada $valor_{calculado\ i}$ de uma determinada falta simulada; e e_{med} é erro relativo médio de todas as faltas de mesmo tipo e mesma distância.

Os resultados obtidos são ainda comparados, em algumas situações, com resultados mostrados em (SOUZA; CHRISTO; ALMEIDA, 2017c) cujo fluxograma é ilustrado na Figura 5.8:

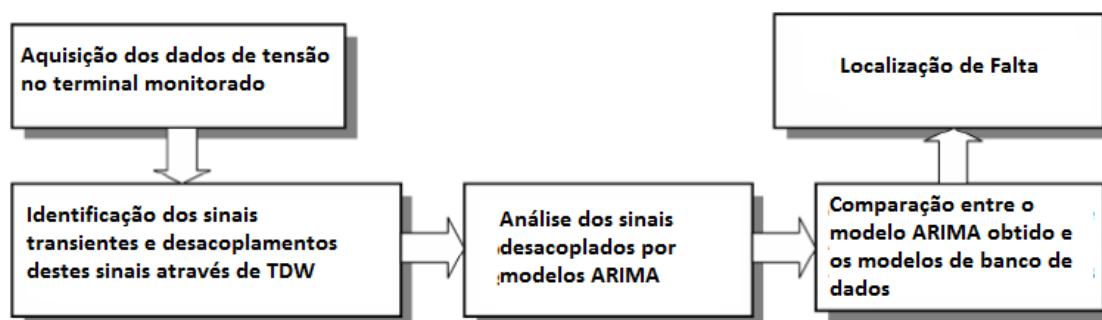


Figura 5.8: Fluxograma de (SOUZA; CHRISTO; ALMEIDA, 2017c).

É também utilizado para comparação, em algumas situações, o trabalho de Almeida (2017), que conforme já citado na Seção 2.2, utiliza a análise de componentes independentes afim de filtrar os sinais analisados, e conjuntamente com *MVS*. Algumas situações de faltas utilizadas neste trabalho são também aqui apresentadas e nelas são utilizadas a técnica abordada.

A seguir é apresentado o fluxograma de (ALMEIDA, 2017) a fim de melhor compreensão. Porém, para maior detalhamento a literatura já apresentada deve ser consultada.

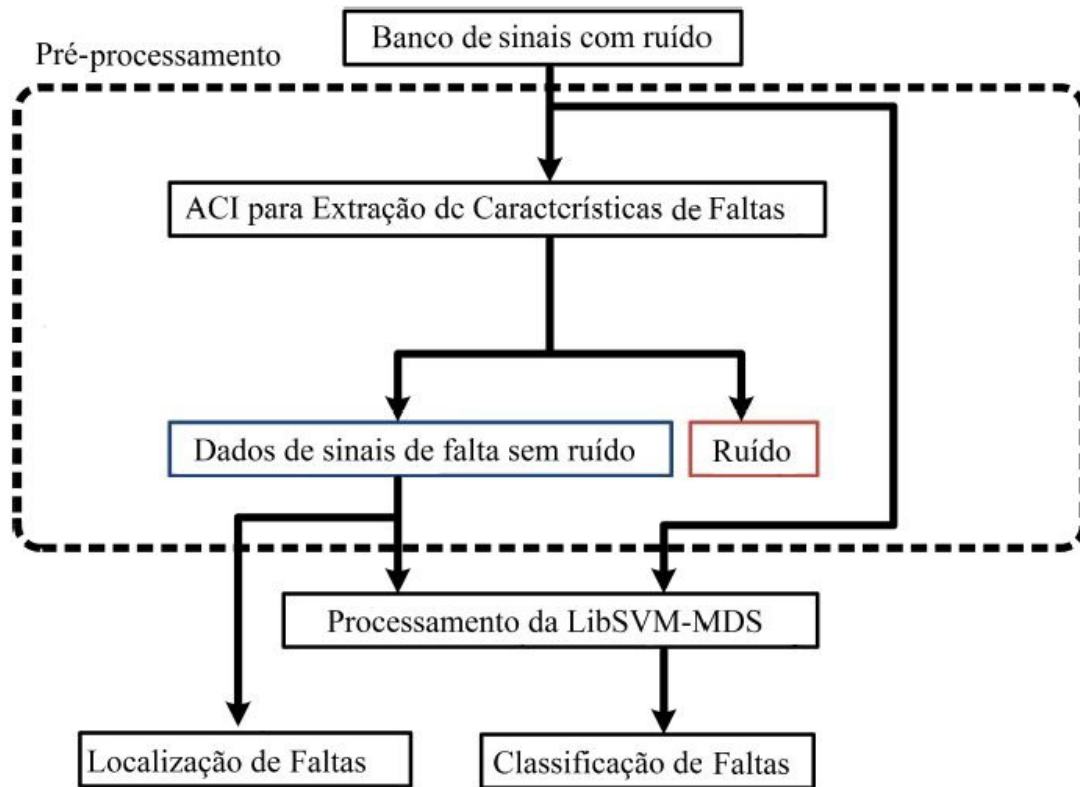


Figura 5.9: Fluxograma de (ALMEIDA, 2017).

Capítulo 6

Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com o uso dos métodos e *software* descritos nos capítulos anteriores. São apresentados os resultados das simulações no *ATPDraw*[®] bem como os resultados da aplicação do método proposto neste trabalho. Os resultados mostrados a seguir são divididos em três etapas.

- Inicialmente são apresentados os resultados relacionados às simulações realizadas para faltas cuja linha de transmissão (Linha 1) é de $200km$ e a frequência de amostragem é de $100kHz$;
- Posteriormente são apresentados resultados para simulações para a Linha 1, porém com frequência de amostragem de $200kHz$ e distâncias de faltas conforme (SOUZA; CHRISTO; ALMEIDA, 2017c), a fim de comparar os resultados obtidos no artigo, usando *SARIMA* e os resultados obtidos observando apenas a *fac*;
- Por fim, são apresentados resultados de simulações realizadas em uma linha de transmissão diferente da anteriormente utilizada (Linha 2), mas com frequência e distâncias equivalentes. Estes resultados são comparados com os obtidos no item anterior.

Para utilização do MMQ (Equação 4.1), é realizado uma média entre os valores de periodicidade relacionados a um mesmo valor de distância e diferentes valores de ângulos de incidência de falta. Com isso, passa-se a ter um único valor de periodicidade relacionado a cada distância.

6.1 Linha 1 - 100kHz

O resultado da aplicação de MMQ para a Linha 1, à frequência de 100kHz e faltas bifásicas, às médias de periodicidade de cada distância de falta é mostrado na Equação 6.1. Sua representação gráfica é apresentada na Figura 6.1, que é a curva de ajuste obtida.

$$y = 4,2 \cdot 10^{-8}x^5 - 1,4 \cdot 10^{-5}x^4 + 1,6 \cdot 10^{-3}x^3 - 7,7 \cdot 10^{-2} \cdot x^2 + 2,9 \cdot x - 12,6 \quad (6.1)$$

Onde: $4x4$ representa a periodicidade média e y a distância de falta.

Esta curva de ajuste fornece um erro relativo médio (Equação 5.8) de $e_{med} = 2,84\%$ e índice de correlação de Pearson (Equação 4.14) de $r = 0,9985$, indicando que distância e periodicidade são fortemente correlacionadas.

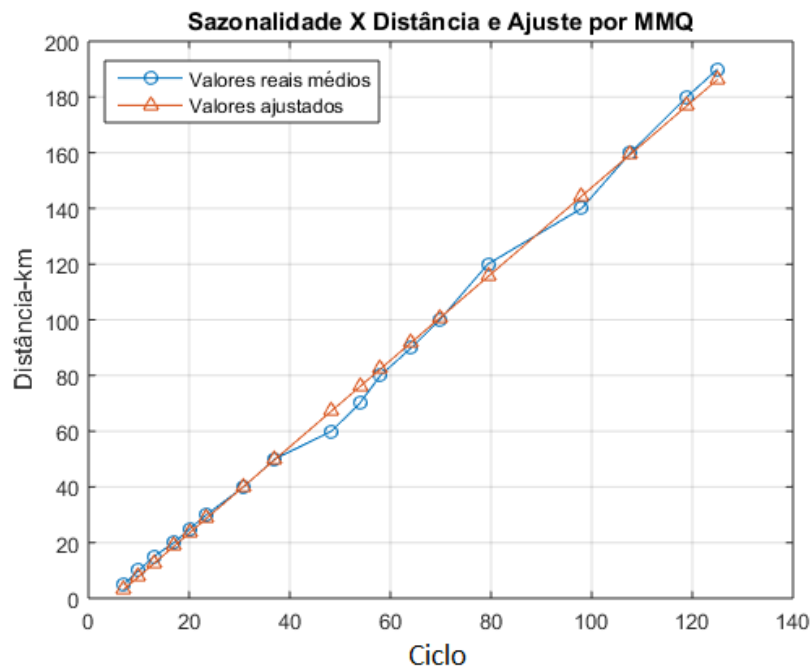


Figura 6.1: Curva de ajuste obtida por meio de MMQ para os valores médios de distâncias.

As Tabelas 6.1 a 6.4 trazem os resultados de cálculo de ângulos, distâncias obtidas através da Equação 6.1 e distâncias pela TOV (Equações 4.49 e 4.50), bem como os respectivos erros relativos médios (Equação 5.8). Por fim, na última linha é mostrada a média aritmética de cada resultado obtido nas linhas anteriores (Equação 4.8).

Tabela 6.1: Falta Bifásica $\hat{A} - \hat{B}$. Linha 1 a 100kHz. Distâncias das faltas simuladas de 5km a 25km com incremento de 5km.

Ângulo °	Ângulo Calculado °	Erro rel. (%)	Periodicidade (<i>fac</i>)	Distância km	Erro rel. (%)	Distância TOV km	Erro rel. (%)
Distância real 5Km							
0	0.00	0.00	7	4.44	0,28	4.50	0,25
30	30.22	0.72	7	4.44	0,28	4.50	0,25
60	60.43	0.72	7	4.44	0,28	4.50	0,25
90	90.86	0.99	7	4.44	0,28	4.50	0,25
120	121.08	0.90	7	4.44	0,28	4.50	0,25
150	149.14	0.57	7	4.44	0,28	4.50	0,25
180	179.35	0.36	7	4.44	0,28	4.50	0,25
210	209.57	0.21	7	4.44	0,28	4.50	0,25
240	240.43	0.18	7	4.44	0,28	4.50	0,25
270	270.00	0.00	7	4.44	0,28	4.50	0,25
300	300.21	0.07	7	4.44	0,28	4.50	0,25
330	330.43	0.13	7	4.44	0,28	4.50	0,25
Valor Médio		0.40	7	4.44	0,28	4.50	0,25
Distância real 10Km							
0	0.43	0.43	10	10,15	0,07	8.99	0,51
30	30.65	2.16	10	10,15	0,07	8.99	0,51
60	60.86	1.44	10	10,15	0,07	8.99	0,51
90	91.29	1.44	10	10,15	0,07	8.99	0,51
120	121.51	1.26	10	10,15	0,07	8.99	0,51
150	149.57	0.29	10	10,15	0,07	8.99	0,51
180	179.78	0.12	10	10,15	0,07	8.99	0,51
210	210.00	0.00	10	10,15	0,07	8.99	0,51
240	240.22	0.09	10	10,15	0,07	8.99	0,51
270	270.43	0.16	10	10,15	0,07	8.99	0,51
300	300.65	0.21	10	10,15	0,07	8.99	0,51
330	330.86	0.26	10	10,15	0,07	8.99	0,51
Valor Médio		0.67	10	10,15	0,07	8.99	0,51
Distância real 15Km							
0	0.86	0.86	13	15,19	0,09	14.49	0,25
30	31.08	3.60	13	15,19	0,09	14.49	0,25
60	61.29	2.16	13	15,19	0,09	14.49	0,25
90	91.73	1.92	13	15,19	0,09	14.49	0,25
120	121.94	1.62	13	15,19	0,09	14.49	0,25
150	150.00	0.00	13	15,19	0,09	14.49	0,25
180	180.22	0.12	13	15,19	0,09	14.49	0,25
210	210.43	0.21	13	15,19	0,09	14.49	0,25
240	240.65	0.27	13	15,19	0,09	14.49	0,25
270	270.86	0.32	13	15,19	0,09	14.49	0,25
300	301.08	0.36	13	15,19	0,09	14.49	0,25
330	331.29	0.39	13	15,19	0,09	14.49	0,25
Valor Médio		0.98	13	15,19	0,09	14.49	0,25
Distância real 20Km							
0	1.08	1.08	17	21,14	0,57	19.48	0,26
30	31.29	4.32	17	21,14	0,57	19.48	0,26
60	61.51	2.52	17	21,14	0,57	19.48	0,26
90	91.92	2.16	17	21,14	0,57	19.48	0,26
120	122.16	1.80	17	21,14	0,57	19.48	0,26
150	150.22	0.14	17	21,14	0,57	19.48	0,26
180	180.43	0.24	17	21,14	0,57	19.48	0,26
210	210.65	0.31	17	21,14	0,57	19.48	0,26
240	240.86	0.36	17	21,14	0,57	19.48	0,26
270	271.08	0.40	17	21,14	0,57	19.48	0,26
300	301.29	0.43	17	21,14	0,57	19.48	0,26
330	331.51	0.46	17	21,14	0,57	19.48	0,26
Valor Médio		1,18	17	21,14	0,57	19.48	0,26
Distância real 25Km							
0	1.51	1.51	20	25,22	0,11	23.98	0,51
30	31.73	5.75	20	25,22	0,11	23.98	0,51
60	61.94	3.24	21	26,53	0,76	23.98	0,51
90	92.37	2.64	21	26,53	0,76	23.98	0,51
120	122.59	2.15	20	25,22	0,11	23.98	0,51
150	150.65	0.43	20	25,22	0,11	23.98	0,51
180	180.86	0.48	20	25,22	0,11	23.98	0,51
210	211.08	0.51	20	25,22	0,11	23.98	0,51
240	241.29	0.54	20	25,22	0,11	23.98	0,51
270	271.51	0.56	20	25,22	0,11	23.98	0,51
300	301.73	0.57	20	25,22	0,11	23.98	0,51
330	331.94	0.59	20	25,22	0,11	23.98	0,51
Valor Médio		1,58	20,17	25,44	0,18	23.98	0,51

Tabela 6.2: Falta Bifásica $\hat{A} - \hat{B}$. Linha 1 a 100kHz. Distâncias das faltas simuladas de 30km a 70km com incremento de 10km.

Ângulo °	Ângulo Calculado °	Erro rel. (%)	Periodicidade (<i>fac</i>)	Distância km	Erro rel. (%)	Distância TOV km	Erro rel. (%)
Distância real 30Km							
0	1.94	1.94	23	29,10	0,45	29,87	0,07
60	62.37	3.97	24	30,37	0,18	29,87	0,07
90	92.81	3.12	24	30,37	0,18	29,87	0,07
120	123.02	2.52	24	30,37	0,18	29,87	0,07
150	151.08	0.72	24	30,37	0,18	29,87	0,07
180	181.29	0.72	23	29,10	0,45	29,87	0,07
210	211.51	0.72	23	29,10	0,45	29,87	0,07
240	241.73	0.72	24	30,37	0,18	29,87	0,07
270	271.94	0.72	23	29,10	0,45	29,87	0,07
300	302.16	0.72	23	29,10	0,45	29,87	0,07
330	332.37	0.72	23	29,10	0,45	29,87	0,07
Valor Médio		1,98	23,42	29,63	0,34	29,87	0,07
Distância real 40Km							
0	2.59	2.59	31	39,16	0,42	38,97	0,52
30	32.81	9.35	30	37,90	0,01	38,97	0,52
60	63.02	5.04	31	39,16	0,42	38,97	0,52
90	93.45	3.84	31	39,16	0,42	38,97	0,52
120	123.67	3.06	31	39,16	0,42	38,97	0,52
150	151.73	1.15	31	39,16	0,42	38,97	0,52
180	181.94	1.08	31	39,16	0,42	38,97	0,52
210	212.16	1.03	30	37,90	0,01	38,97	0,52
240	242.37	0.99	31	39,16	0,42	38,97	0,52
270	272.59	0.96	31	39,16	0,42	38,97	0,52
300	302.81	0.93	31	39,16	0,42	38,97	0,52
330	333.02	0.91	30	37,90	0,01	38,97	0,52
Valor Médio		1,90	30,75	39,16	0,32	38,97	0,52
Distância real 50Km							
0	3.24	3.24	37	47,00	1,50	50,96	0,48
30	33.45	11.51	37	47,00	1,50	50,96	0,48
60	63.67	6.12	37	47,00	1,50	50,96	0,48
90	94.10	4.56	37	47,00	1,50	50,96	0,48
120	124.32	3.60	37	47,00	1,50	50,96	0,48
150	152.37	1.58	37	47,00	1,50	50,96	0,48
180	182.59	1.44	37	47,00	1,50	50,96	0,48
210	212.81	1.34	37	47,00	1,50	50,96	0,48
240	243.02	1.26	37	47,00	1,50	50,96	0,48
270	273.24	1.20	37	47,00	1,50	50,96	0,48
300	303.45	1.15	37	47,00	1,50	50,96	0,48
330	333.67	1.11	37	47,00	1,50	50,96	0,48
Valor Médio		3,17	37	47,00	1,50	50,96	0,48
Distância real 60Km							
0	4.10	4.10	44	56,86	1,57	58,45	0,78
30	34.32	14.39	40	56,86	1,57	58,45	0,78
60	64.53	7.55	44	56,86	1,57	58,45	0,78
90	94.96	5.52	44	56,86	1,57	56,95	1,53
120	125.18	4.32	44	56,86	1,57	56,95	1,53
150	153.24	2.16	44	56,86	1,57	56,95	1,53
180	183.45	1.92	44	56,86	1,57	56,95	1,53
210	213.67	1.75	44	56,86	1,57	56,95	1,53
240	243.88	1.62	44	56,86	1,57	58,45	0,78
270	274.10	1.52	44	56,86	1,57	58,45	0,78
300	304.32	1.44	44	56,86	1,57	58,45	0,78
330	334.53	1.37	44	56,86	1,57	58,45	0,78
Valor Médio		3,97	43,67	56,86	1,57	57,82	1,09
Distância real 70Km							
0	4.75	4.75	51	69,50	0,25	70,44	0,28
30	34.96	16.55	51	69,50	0,25	130,40	30,20
60	65.18	8.63	51	69,50	0,25	65,95	0,28
90	95.61	6.24	51	69,50	0,25	65,95	0,28
120	125.83	4.86	51	69,50	0,25	65,95	0,28
150	153.88	2.59	51	69,50	0,25	65,95	0,28
180	184.10	2.28	51	69,50	0,25	70,44	0,22
210	214.32	2.06	88	124,00	27,00	130,40	30,20
240	244.53	1.89	51	69,50	0,25	70,44	0,22
270	274.75	1.76	51	69,50	0,25	70,44	0,22
300	304.96	1.65	51	69,50	0,25	70,44	0,22
330	335.76	1.75	51	69,50	0,25	70,44	0,22
Valor Médio		4,58	53,67	74,04	2,48	78,61	5,24

Tabela 6.3: Falta Bifásica $\hat{A} - \hat{B}$. Linha 1 a 100kHz. Distâncias das faltas simuladas de 80km a 140km com incremento de 10km.

Ângulo °	Ângulo Calculado °	Erro rel. (%)	Periodicidade (<i>fac</i>)	Distância km	Erro rel. (%)	Distância TOV km	Erro rel. (%)
Distância real 80Km							
0	5.40	5.40	58	79.21	0,40	80.94	0,47
30	35.61	18.71	58	79.21	0,40	79.44	0,28
60	65.83	9.71	58	79.21	0,40	80.94	0,47
90	96.26	6.95	58	79.21	0,40	80.94	0,47
120	126.47	5.40	58	79.21	0,40	80.94	0,47
150	154.53	3.02	58	79.21	0,40	80.94	0,47
180	184.75	2.64	58	79.21	0,40	80.94	0,47
210	214.96	2.36	58	79.21	0,40	79.44	0,28
240	245.18	2.16	58	79.21	0,40	80.94	0,47
270	275.40	2,00	58	79.21	0,40	80.94	0,47
300	305.61	1.87	58	79.21	0,40	80.94	0,47
330	334.17	1.26	58	79.21	0,40	80.94	0,47
Valor Médio		5,12	58	79.21	0,40	80.69	0,44
Distância real 90Km							
0	6.26	6.26	64	89.54	0,23	89.93	0,04
30	36.47	21.58	65	91.28	0,64	86.93	1,54
60	66.69	11.15	65	91.28	0,64	86.93	1,54
90	97.12	7.91	64	89.54	0,23	86.93	1,54
120	127.34	6.12	64	89.54	0,23	86.93	1,54
150	155.4	3.6	64	89.54	0,23	86.93	1,54
180	185.61	3.12	64	89.54	0,23	89.93	0,04
210	215.83	2.77	64	89.54	0,23	89.93	0,04
240	246.04	2.52	64	89.54	0,23	89.93	0,04
270	276.26	2.32	64	89.54	0,23	89.93	0,04
300	306.47	2.16	64	89.54	0,23	89.93	0,04
330	336.47	1,93	64	89.54	0,23	89.93	0,04
Valor Médio		1,93	64	89.54	0,30	89.93	0,12
Distância real 100Km							
0	6.91	6.91	71	101.73	0,86	98.92	0,54
30	37.12	23.74	71	101.73	0,86	100.42	0,21
60	67.34	12.23	71	101.73	0,86	95.92	2,04
90	97.77	8.63	71	101.73	0,86	95.92	2,04
120	127.99	6.65	71	101.73	0,86	95.92	2,04
150	156.04	4.03	71	101.73	0,86	95.92	2,04
180	186.26	3.48	71	101.73	0,86	98.92	2,04
210	216.47	3.08	71	101.73	0,86	100.42	0,21
240	246.69	2.79	71	101.73	0,86	100.42	0,21
270	276.91	2.56	71	101.73	0,86	100.42	0,21
300	307.12	2.37	71	101.73	0,86	100.42	0,21
330	336.85	2.07	71	101.73	0,86	100.42	0,21
Valor Médio		2.07	71	101.73	0,86	98,67	1,45
Distância real 120Km							
0	8.42	8.42	54	72.52	23,74	79.44	33.80
30	38.63	28.78	85	125.16	2,58	116.91	1,55
60	68.85	14.75	85	125.16	2,58	116.91	1,55
90	99.28	10.31	85	125.16	2,58	116.91	1,55
120	129.50	7.91	85	125.16	2,58	116.91	1,55
150	157.55	5.04	85	125.16	4,30	116.91	1,55
180	187.77	4.32	54	72.52	23,74	79.44	33.80
210	217.99	3.80	85	125.16	2,58	119.90	0,05
240	248.2	3.42	85	125.16	2,58	119.90	0,05
270	278.42	3.12	85	125.16	2,58	119.90	0,05
300	308.63	2.88	85	125.16	2,58	119.90	0,05
330	338.34	2.53	85	125.16	2,58	119.90	0,05
Valor Médio		7,94	79,83	116,38	6,11	111.91	6,30
Distância real 140Km							
0	9.93	9.93	98	144.74	2,37	137.89	1,06
30	40.14	33.81	98	144.74	2,37	137.89	1,06
60	70.36	17.27	98	144.74	2,37	137.89	1,06
90	100.79	11.99	98	144.74	2,37	137.89	1,06
120	131.01	9.17	98	144.74	2,37	137.89	1,06
150	159.06	6.04	98	144.74	2,37	137.89	1,06
180	189.28	5.16	98	144.74	2,37	140.89	0,06
210	219.5	4.52	98	144.74	2,37	140.89	0,06
240	249.71	4.05	98	144.74	2,37	140.89	0,06
270	279.93	3.68	98	144.74	2,37	140.89	0,06
300	310.14	3.38	98	144.74	2,37	140.89	0,06
330	339.85	2.98	98	144.74	2,37	140.89	0,06
Valor Médio		9,33	98	144.74	2,37	139,39	0,83

Tabela 6.4: Falta Bifásica $\hat{A} - \hat{B}$. Linha 1 a 100kHz. Distâncias das faltas simuladas de 160km, 180km e 190km.

Ângulo °	Ângulo Calculado °	Erro rel. (%)	Periodicidade (<i>fac</i>)	Distância km	Erro rel. (%)	Distância TOV km	Erro rel. (%)
Distância real 160Km							
0	11.22	11,22	112	165.42	2,71	160.37	0,18
30	41.44	38.13	112	165.42	2,71	160.37	0,18
60	71.65	19.42	112	165.42	2,71	160.37	0,18
90	102.09	13.43	112	165.42	2,71	160.37	0,18
120	132.3	10.25	112	165.42	2,71	160.37	0,18
150	160.36	6.91	65	91.27	34,36	160.37	0,18
180	190.58	5.88	112	165.42	2,71	160.37	0,18
210	220.79	5.14	112	165.42	2,71	160.37	0,18
240	251.01	4.59	112	165.42	2,71	160.37	0,18
270	281.22	4.16	112	165.42	2,71	160.37	0,18
300	311.44	3.81	112	165.42	2,71	160.37	0,18
330	341.66	3.53	112	165.42	2,71	160.37	0,18
Valor Médio		10,53	108,08	159,24	5,34	160.37	0,18
Distância real 180Km							
0	12.73	12,73	126	193.98	1,99	179.86	0,07
30	42.95	43.17	126	193.98	1,99	175.36	2,32
60	73.17	21.94	126	193.98	1,99	175.36	2,32
90	103.6	15.11	126	193.98	1,99	175.36	2,32
120	133.81	11.51	126	193.98	1,99	175.36	2,32
150	161.87	7.91	49	64.47	57,56	121.40	29,30
180	192.09	6.71	126	193.98	1,99	179.86	0,07
210	222.3	5.86	126	193.98	1,99	179.86	0,07
240	252.52	5.22	126	193.98	1,99	179.86	0,07
270	282.73	4.72	126	193.98	1,99	179.86	0,07
300	312.95	4.32	125	191.36	0,68	179.86	0,07
330	342.03	3,65	126	193.98	1,99	179.86	0,07
Valor Médio		11,90	119,58	183,02	6,51	173,49	3,45
Distância real 190Km							
0	13.38	13,38	132	212.60	11,30	191.85	0,93
30	43.60	45.32	132	212.60	11,30	191.85	0,93
60	73.81	23.02	132	212.60	11,30	191.85	0,93
90	104.24	15.83	132	212.60	11,30	191.85	0,93
120	134.46	12.05	132	212.60	11,30	191.85	0,93
150	162.52	8.35	55	74.17	57,91	56.61	66,70
180	192.73	7.07	132	212.60	11,30	191.85	0,93
210	222.95	6.17	132	212.60	11,30	191.85	0,93
240	253.17	5.49	132	212.60	11,30	191.85	0,93
270	283.38	4.96	132	212.60	11,30	191.85	0,93
300	313.60	4.53	132	212.60	11,30	191.85	0,93
330	343.91	4.21	132	212.60	11,30	191.85	0,93
Valor Médio		12,53	125,58	201,06	15,18	180,58	6,41

A Figura 6.2 a seguir ilustra os resultados mostrados nas Tabelas 6.1 a 6.4.

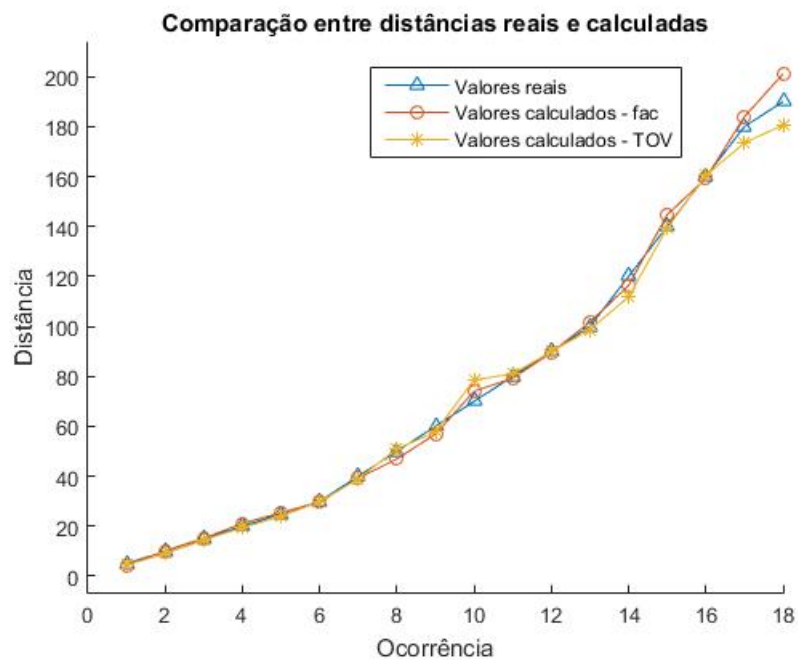


Figura 6.2: Comparação entre as distâncias médias reais e calculadas para resultados mostrados nas Tabelas 6.1 a 6.4.

Como os valores são bastante próximos, não é possível visualizar as diferenças existentes. Para isso mostra-se os erros absolutos na Figura 6.3.

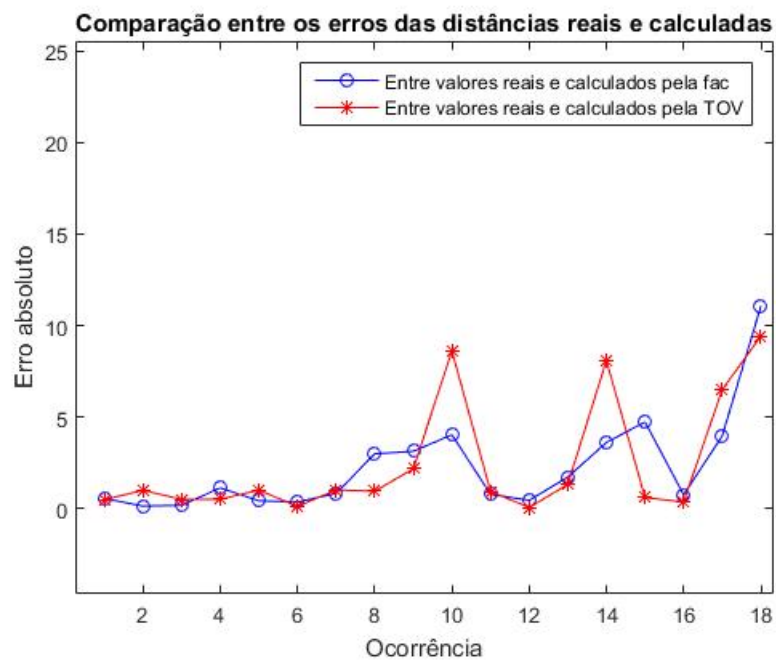


Figura 6.3: Comparação entre os erros absolutos das distâncias médias reais e calculadas para resultados mostrados nas Tabelas 6.2 a 6.5.

Utilizando a TOV tem-se um erro médio absoluto de 2,43 km. Já com o método aqui proposto este erro é de 2,27 km. Com isso, para estas simulações conclui-se que o método aqui proposto apresenta melhores resultados quando comparados á TOV.

6.2 Linha 1 - 200kHz

Já para a frequência de 200kHz, obtêm-se a Equação 6.2 como resultado da utilização de MMQ. Sua curva de ajuste é mostrada na Figura 6.4.

$$y = 6,5 \cdot 10^{-10}x^5 - 3,0 \cdot 10^{-7}x^4 + 4,9 \cdot 10^{-5}x^3 + 0,9 \cdot x - 4,9 \quad (6.2)$$

Onde: x representa a periodicidade média e y a distância de falta.

Esta curva de ajuste fornece um erro relativo médio de $e_{med} = 0,51\%$ e índice de correlação de $r = 1$, indicando que distância e periodicidade são totalmente correlacionadas.

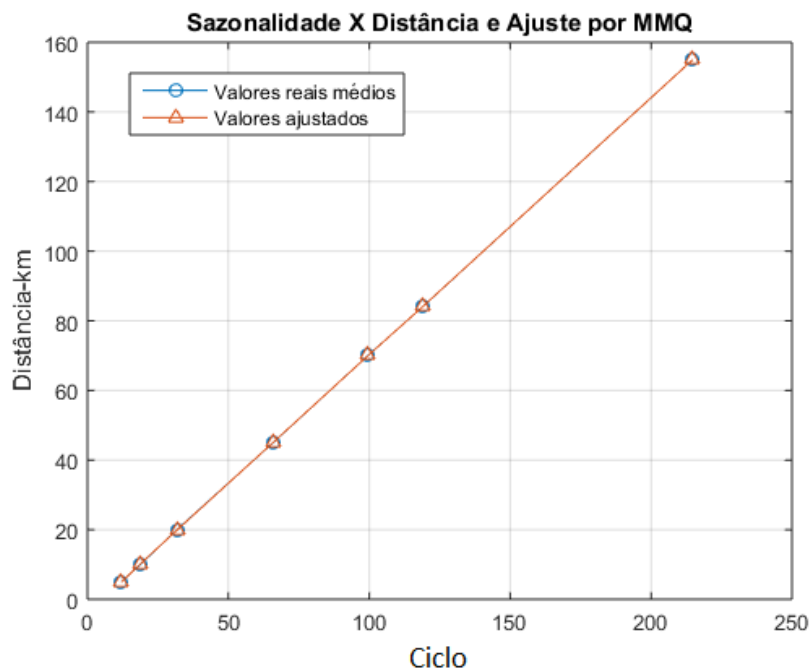


Figura 6.4: Curva de ajuste obtida por meio de MMQ para os valores médios de distâncias. Frequência de 200kHz.

As Tabelas 6.5 e 6.6 mostram os resultados de cálculo de ângulos, distâncias obtidas através da Equação 6.2 e distâncias pela TOV, bem como os respectivos erros relativos médios.

Tabela 6.5: Falta bifásica $\hat{A} - \hat{B}$, Linha 1 a 200kHz. Distâncias das faltas simuladas de 5km a 4km.

Ângulo °	Ângulo Calculado °	Erro rel. (%)	Periodicidade (<i>fac</i>)	Distância km	Erro rel. (%)	Distância TOV km	Erro rel. (%)
Distância real 5km							
0	0.22	0.22	12	4.93	0,03	4.5	2,50
45	45.66	1.47	12	4.93	0,03	4.5	2,50
90	91.00	1.11	12	4.93	0,03	4.5	2,50
135	136.34	0.99	12	4.93	0,03	4.5	2,50
180	179.51	0.27	12	4.93	0,03	4.5	2,50
225	224.85	0.07	12	4.93	0,03	4.5	2,50
270	270.19	0.07	12	4.93	0,03	4.5	2,50
315	315.53	0.17	12	4.93	0,03	4.5	2,50
Valor Médio		0,55	12	4,93	0,03	4,50	2,50
Distância real 10Km							
0	0.54	0.54	19	10.34	0,17	10.49	0,25
45	45.99	2.19	18	9.58	0,21	10.49	0,25
90	91.32	1.47	19	10.34	0,17	10.49	0,25
135	136.66	1.23	19	10.34	0,17	10.49	0,25
180	179.84	0.09	19	10.34	0,17	10.49	0,25
225	225.18	0.08	18	9.58	0,21	10.49	0,25
270	270.51	0.19	19	10.34	0,17	10.49	0,25
315	315.85	0.27	19	10.34	0,17	10.49	0,25
Valor Médio		0,23	18,25	10,15	0,18	10.49	0,25
Distância real 20Km							
0	1.30	1.3	32	20.08	0,04	20.24	1.2
45	46.74	3.87	32	20.08	0,04	20.24	1.2
90	92.08	2.31	32	20.08	0,04	20.24	1.2
135	137.42	1.79	32	20.08	0,04	20.24	1.2
180	180.59	0.33	32	20.08	0,04	20.24	1.2
225	225.93	0.41	32	20.08	0,04	20.24	1.2
270	271.27	0.47	32	20.08	0,04	20.24	1.2
315	316.61	0.51	32	20.08	0,04	20.24	1.2
Valor Médio		1,37	32	20,08	0,04	20,24	1,20
Distância real 45Km							
0	3.13	3.13	66	45.14	0,07	44.98	0,01
45	48.58	7.95	66	45.14	0,07	44.98	0,01
90	93.91	4.35	66	45.14	0,07	43.48	0,76
135	139.25	3.15	66	45.14	0,07	43.48	0,76
180	182.43	1.35	66	45.14	0,07	43.48	0,76
225	227.77	1.23	66	45.14	0,07	44.98	0,01
270	273.1	1.15	66	45.14	0,07	44.98	0,01
315	318.44	1.09	66	45.14	0,07	44.98	0,01
Valor Médio		1,37	66	45,14	0,07	44,73	0,02
Distância real 70Km							
0	4.97	4.97	99	69.61	0,18	70.46	0,23
45	50.41	12.02	100	70.34	0,17	70.46	0,23
90	95.75	6.39	100	70.34	0,17	68.97	0,62
135	141.09	4.51	100	70.34	0,17	68.97	0,62
180	184.26	2.37	99	69.61	0,18	70.46	0,23
225	229.6	2.04	100	70.34	0,17	70.46	0,23
270	274.94	1.83	99	69.61	0,18	70.46	0,23
315	320.28	1.67	99	69.61	0,18	70.46	0,23
Valor Médio		4,48	99,50	69,98	0,18	70,08	0,32
Distância real 84Km							
0	5.94	5.94	119	84.10	0,50	84.71	0,36
45	51.38	14.18	119	84.10	0,50	81.71	1,36
90	96.72	7.47	119	84.10	0,50	81.71	1,36
135	142.06	5.23	119	84.10	0,50	81.71	1,36
180	185.24	2.91	119	84.10	0,50	84.71	0,36
225	230.57	2.48	119	84.10	0,50	84.71	0,36
270	275.91	2.19	119	84.10	0,50	84.71	0,36
315	321.25	1.98	118	83.39	0,30	84.71	0,36
Valor Médio		5,30	118,88	84,01	0,48	83,58	0,74

Tabela 6.6: Falta bifásica $\hat{A} - \hat{B}$, Linha 1 a 200kHz. Distância das faltas simuladas de 155km

Ângulo °	Ângulo Calculado °	Erro rel. (%)	Periodicidade (<i>fac</i>)	Distância km	Erro rel. (%)	Distância TOV km	Erro rel. (%)
Distância real 155Km							
0	11.12	11.12	215	155.26	0,13	156.67	0,84
45	56.56	25.70	215	155.26	0,13	153.67	0,17
90	101.90	13.22	215	155.26	0,13	153.67	0,17
135	147.24	9.07	215	155.26	0,13	153.67	0,17
180	190.42	5.79	215	155.26	0,13	156.67	0,84
225	235.75	4.78	215	155.26	0,13	156.67	0,84
270	281.09	4.11	215	155.26	0,13	156.67	0,84
315	326.43	3.63	215	155.26	0,13	156.67	0,84
Valor Médio		5,30	215	155.26	0,13	153,67	0,59

A Figura 6.5 a seguir ilustra os resultados da Tabela 6.5.

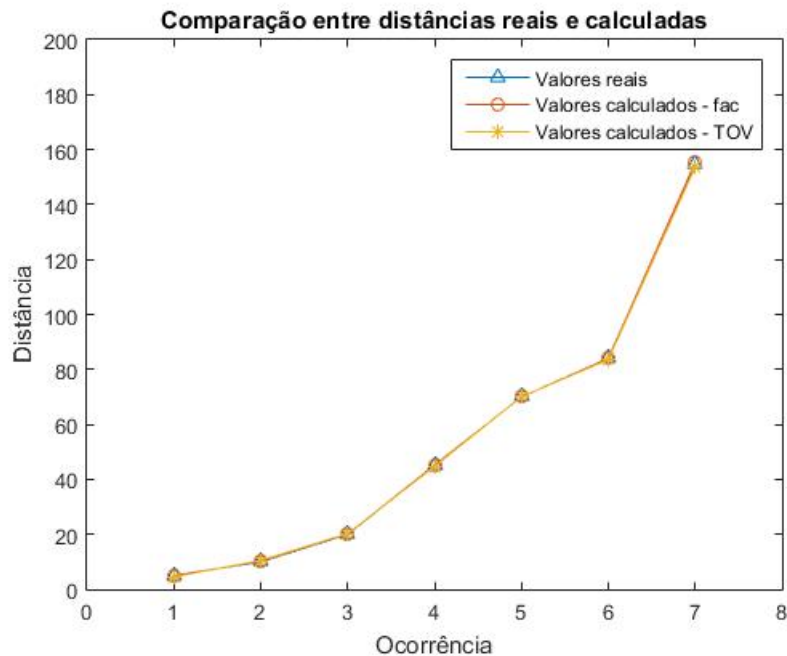


Figura 6.5: Comparação entre as distâncias médias reais e calculadas para resultados mostrados na Tabela 6.5.

Os erros absolutos são mostrados na Figura 6.6, onde é possível verificar como sendo o método da *fac* melhor que o uso da TOV.

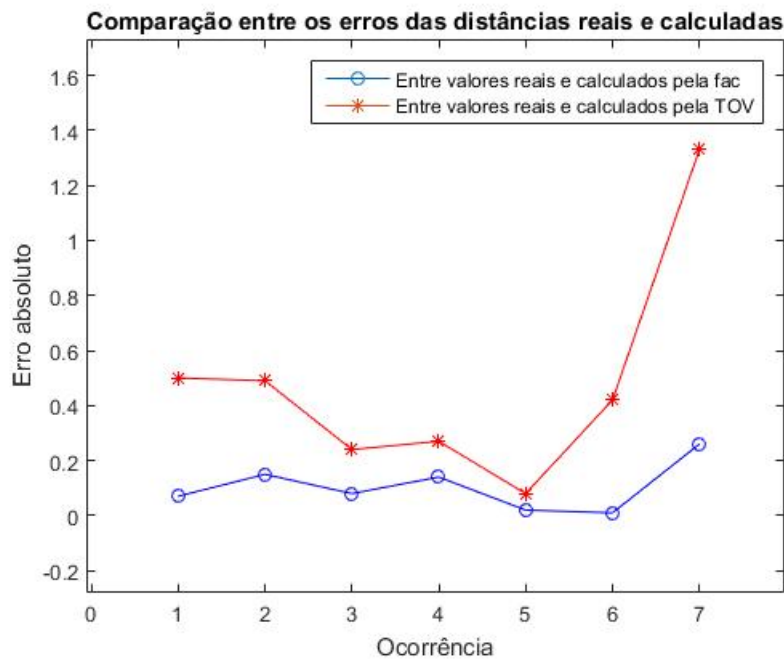


Figura 6.6: Comparação entre os erros absolutos das distâncias médias reais e calculadas para resultados mostrados na Tabela 6.5.

Utilizando a TOV para os dados da Tabela 6.5 o erro absoluto médio é de 0,48 km e pela análise de período da *fac* este erro é 0,10 km. Como o denominador do cálculo do erro relativo é sempre 200 (comprimento da LT simulada em quilômetros), para calculá-lo em percentuais a partir do erro absoluto, basta dividir este último erro por 2. Sendo que o mesmo se aplica a seus valores médios.

6.3 Linha 2 - 200kHz

A Tabela 6.7 traz uma comparação entre os resultados médios mostrados em (ALMEIDA, 2017, pp. 78). O método exposto neste trabalho foi utilizado em algumas situações de faltas simuladas por Almeida (2017).

Tabela 6.7: Falta bifásica $\hat{A} - \hat{B}$, Banco de dados (ALMEIDA, 2017).

Ângulo °	Ângulo Calculado °	Erro rel. (%)	Periodicidade (<i>fac</i>)	Distância <i>km</i>	Erro rel. (%)
Distância real 10 <i>km</i>					
0	0,17	0,17	26	9,95	0,02
45	45,23	0,51	26	9,95	0,02
90	89,06	1,04	26	9,95	0,02
135	135,99	0,73	26	9,95	0,02
180	179,00	0,05	26	9,95	0,02
225	223,85	0,51	26	9,95	0,02
270	270,20	0,10	26	9,95	0,02
315	314,34	0,31	26	9,95	0,02
Valor Médio		0,42	26	9,95	0,02
Valor Médio (ALMEIDA, 2017)					0,01
Distância real 45 <i>km</i>					
0	0,18	0,18	38	45,10	0,05
45	45,30	0,67	38	45,10	0,05
90	90,00	0,00	38	45,10	0,05
135	136,01	0,75	38	45,10	0,05
180	179,05	0,53	38	45,10	0,05
225	223,99	0,45	38	45,10	0,05
270	270,32	0,19	38	45,10	0,05
315	314,45	0,17	38	45,10	0,05
Valor Médio		0,37	38	45,10	0,05
Valor Médio (ALMEIDA, 2017)					0,02
Distância real 84 <i>km</i>					
0	0,27	0,27	52	85,83	0,42
45	45,24	0,54	52	85,83	0,42
90	89,92	0,09	52	85,83	0,42
135	135,81	0,60	52	85,83	0,42
180	170,09	0,05	52	85,83	0,42
225	226,35	0,60	51	82,90	1,05
270	270,30	0,11	52	85,83	0,42
315	313,68	0,42	52	85,83	0,42
Valor Médio		0,34	51,63	85,46	0,50
Valor Médio (ALMEIDA, 2017)					0,02
Distância real 155 <i>km</i>					
0	0,25	0,25	75	152,90	1,05
45	45,85	1,89	75	152,90	1,05
90	90,99	1,10	75	152,90	1,05
135	137,01	1,49	75	152,90	1,05
180	181,00	0,56	75	152,90	1,05
225	226,52	0,51	75	152,90	1,05
270	271,07	0,56	75	152,90	1,05
315	316,97	0,62	76	155,83	0,42
Valor Médio		0,87	75	153,26	0,97
Valor Médio (ALMEIDA, 2017)					0,10

É realizado um ajuste por MMQ (Equação 4.1) do valor médio de ciclo obtido relacionado a um mesmo valor de distância e diferentes valores de ângulos de incidência de falta. A Figura 6.7 ilustra a Equação 6.3, curva de ajuste calculada a partir do método de mínimos quadrados.

$$y = -1,0 \cdot 10^{-4}x^3 + 8,0 \cdot 10^{-3}x^2 + 2,6x - 62,0 \quad (6.3)$$

Esta curva de ajuste fornece um erro relativo médio (Equação 5.8) de $e_{med} = 2,71 \times 10^{-13}\%$ e índice de correlação de Pearson (Equação 4.14) de $r = 1,0$, indicando que distância e periodicidade são fortemente correlacionadas.

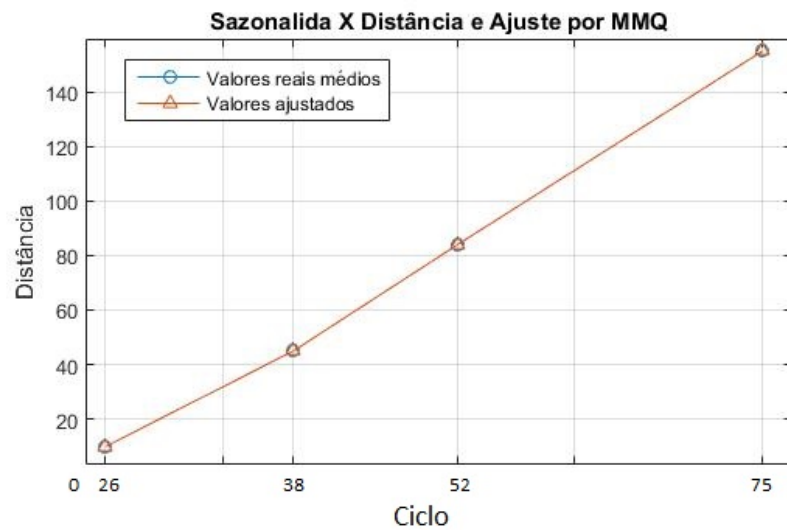


Figura 6.7: Curva de ajuste obtida por meio de MMQ para os valores médios de distâncias.

O gráfico da Figura 6.8 mostra uma comparação entre os métodos através dos erros relativos calculados. O método proposto por (ALMEIDA, 2017) apresenta melhores resultados quando comparado com a técnica aqui proposta. Porém isso não torna o método ineficaz visto o relativo se mantém inferior a 1,00%.

Nota-se que para as distâncias mais próximas ao terminal de medição, os erros são bem próximos para ambas as técnicas. Isso pode ser observado também nas tabelas anteriores onde se faz a comparação com a TOV.

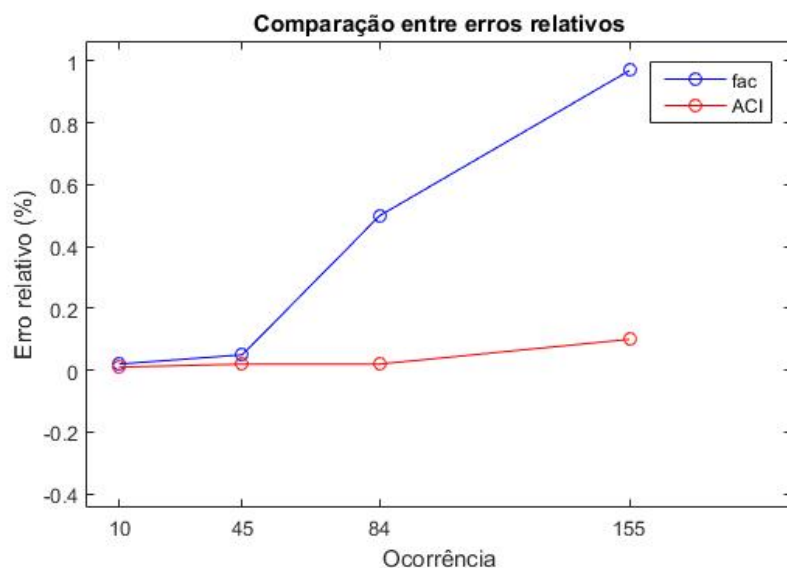


Figura 6.8: Comparação entre os erros relativos percentuais entre o método proposto e (ALMEIDA, 2017).

6.4 Comparações entre técnicas diversas

A Tabela 6.8 faz uma comparação entre os erros relativos médios para intervalos de distâncias utilizando a TOV conforme (SOUZA; CHRISTO; ALMEIDA, 2017c), a Transformada de Stockwell (SOUZA et al., 2015) e o método proposto neste trabalho.

Tabela 6.8: Comparação entre erros relativos médios para situações de faltas bifásicas.

Séries Temporais (SOUZA; CHRISTO; ALMEIDA, 2017c)	Transformada de Stockwell (SOUZA et al., 2015)	Redes Neurais (SOUZA et al., 2015)	<i>fac</i>
Intervalo de distâncias reais 5 – 10Km			
2,60	2,17	0,90	1,38
Intervalo de distâncias reais 20 – 45Km			
3,70	0,51	0,80	0,61
Intervalo de distâncias reais 70 – 84Km			
1,20	1,66	2,55	0,53
Valores Médios			
2,83%	1,09%	1,06%	0,63%

Verifica-se que o erro médio relativo apresentado pela técnica da função de autocorrelação apresenta melhores resultados quando comparados com as outras técnicas.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalhos Futuros

7.1 Conclusões

Neste trabalho foram analisados dados simulados de anomalias em uma linha de transmissão. Os dados de tensão gerados são abordados de uma perspectiva de análise destas séries temporais, tornando possível compreender mudanças no comportamento nos parâmetros do modelo adotado à medida em que as características de faltas na linha simulada são alteradas. O principal objetivo desta análise seria que, apenas a partir da oscilografia de tensão, fôssemos capazes de calcular o local geográfico de ocorrência da falta na linha, bem como classificar o tipo de falta.

Observa-se a proporção entre a localização geográfica das faltas na LT e as periodicidades presentes nas *facs* das séries temporais analisadas. Para facilitar o processo de identificação destas periodicidades foi necessário inicialmente extrair os dados dos distúrbios das senoides características da tensão de CA a $60Hz$. Com isso as STs resultantes são totalmente relacionadas às faltas.

Posteriormente, calculam-se as $facs^{(n)}$, que são as funções de autocorrelações sucessivas. O objetivo é deixar o mais nítido possível a periodicidade presente nas *facs*. Observou-se que $fac^{(4)}$ foi suficiente para atender as necessidades nos casos observados. Com isso, para cada situação de falta simulada calculou-se a periodicidade média, e para cada distância simulada, e com ângulos de incidência distintos, calculou-se uma nova periodicidade média relacionada a esta distância. O objetivo deste processo é construir uma série de pontos em R^2 relacionando periodicidade com distância, para então, através de MMQ equacionar por polinômios esta relação. Este polinômio é capaz de atender apenas a um tipo específico de falta (Seção 3.2). Desta forma são necessários quatro polinômios *periodicidade X distância* para representar todas as faltas possíveis na LT simulada.

Porém neste trabalho foi gerado apenas o polinômio relacionado às faltas bifásicas sem aterramento. O motivo desta escolha foi que, para faltas que envolvem a componente terra, tanto nos dados de tensão quanto em suas *facs*, não ser possível identificar as periodicidades devido à existência de sinais refratados (Seção 4.3). Já para faltas trifásicas, o comportamento das *facs* é exatamente o mesmo que para as faltas bifásicas apresentadas neste trabalho. Com isso os polinômios caracterizadores na LT se reduzem a três.

Os resultados obtidos foram satisfatórios, apesar da existência de algumas limitações encontradas. Para validação os resultados foram confrontados com técnicas de localização já difundidas e utilizadas na prática.

O algoritmo desenvolvido para a busca de periodicidade bem como o algoritmo utilizado para determinação dos tempos da TOV apresentam falhas em alguns pontos, visto que nem todos os picos de tensão presentes nos vetores analisados são proporcionais às distâncias de faltas em questão. Tal fato reforça a necessidade de análises espectrais, como a já mencionada densidade espectral de potência, por serem mais robustas para esta aplicação.

Algumas observações acerca do método são mostrados a seguir:

- Atual inaplicabilidade em faltas que envolvam o componente terra devido ao surgimento das ondas refratadas, o que modifica totalmente o padrão observado nas *fac's* nas outras situações. Este problema pode ser contornado com o pré uso de filtros de frequência;
- Necessidade do conhecimento do ciclo senoidal de ocorrência da falta devido ao uso das Séries de Fourier. Este problema pode ser contornado utilizando Transformada Wavelet;
- Devido ao fato das *fac's* apresentarem, evidentemente, números inteiros de *lag's* isso faz com que um valor de sazonalidade corresponda a um intervalo contendo vários valores de distâncias. Esta insensibilidade do método proposto em identificar pequenas alterações de distâncias é minimizada à medida em que a frequência de amostragem é elevada. Isso diminui o mencionado intervalo de distâncias relativo a uma mesma sazonalidade detectada na *fac*;
- Porém, ao passo que elevar a frequência de amostragem aumenta a sensibilidade do método, isso faz com que os tempos de execução dos algoritmos também se elevem. Devido à limitação computacional encontrada, optou-se pela adoção de frequências de amostragem relativamente baixas: $100kHz$ e $200kHz$. Para verificação da

sensibilidade à variações de frequências pode-se realizar simulações de faltas considerando distâncias com valores próximos um dos outros, a fim de averiguar qual intervalo de distâncias um único valor de sazonalidade representa;

- O método proposto lança luz ao uso de análises de séries temporais com o objetivo proposto, uma vez que pesquisas nesta vertente são escassas ou até mesmo inexistentes.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como continuidade desta pesquisa sugere-se a continuidade da investigação do comportamento dos coeficientes dos modelos *SARIMA*. Buscar formas de aplicar o método a dados de faltas com o componente terra. Utilizar dados reais de faltas a fim de verificar o real comportamento do método. Verificar a aplicabilidade de mínimos quadrados para determinação das constantes de atenuação e fase, e assim obter-se maiores informações sobre a origem das faltas.

Com relação a velocidade de computação dos dados pode-se utilizar programação paralela tanto para o processamento do banco de dados quanto para uma possível aplicação da *facp* (onde é necessário o cálculo de uma matriz inversa - Equação 4.12).

7.3 Contribuições

O desenvolvimento desta pesquisa originou em:

- dois artigos científicos: (SOUZA; CHRISTO; ALMEIDA, 2017c) e (SOUZA et al., 2018b);
- uma participação em congresso com apresentação oral: (SOUZA; CHRISTO; ALMEIDA, 2017a);
- três participações em congressos com apresentações em pôsteres: (SOUZA; CHRISTO; ALMEIDA, 2017b), (SOUZA; CHRISTO; ALMEIDA, 2017d) e (SOUZA et al., 2018a).

Referências

- AGUILAR, R.; PÉREZ, F.; ORDUÑA, E. Proteção de linha de transmissão de alta velocidade usando análise de componente principal, um algoritmo determinista. *IET Geração, Transmissão & Distribuição*, v. 5, n. 7, p. 712–719, 2011.
- AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. *IEEE transactions on automatic control*, IEEE, v. 19, n. 6, p. 716–723, 1974.
- AKAIKE, H. On entropy maximization principle. *Application of statistics*, North-Holland, v. 543, p. 27–41, 1977.
- ALHASSID, Y.; FYODOROV, Y. V. Spectral autocorrelation function in weakly open chaotic systems: Indirect photodissociation of molecules. *The Journal of Physical Chemistry A*, ACS Publications, v. 102, n. 47, p. 9577–9580, 1998.
- ALMEIDA, A. R. *Localização de Falhas em Sistemas de Transmissão de Alta Tensão usando ICA*. 2007.
- ALMEIDA, A. R. *O uso de Análise de Componentes Independentes na Extração de Características dos Sinais Transitórios de Falhas em Linhas de Transmissão de Energia Elétrica*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Ceará, 2017.
- ALMEIDA, A. R. et al. Localização de faltas em sistemas de transmissão de alta tensão a partir de registros oscilográficos usando análise de componentes independentes. *Anais do V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 2014.
- ALVES, M. H. da S. *Localização de Falhas em Sistemas de Transmissão Aplicando a Teoria das Ondas Viajantes e Filtragem Adaptativa*. 2015.
- AMARAL, R. C. d. et al. Dimensionamento de fundações para torres metálicas de linha de transmissão de energia elétrica. 2015.
- ANEEL. Agência nacional de energia elétrica. *Brasília: Aneel*, 2008.
- AYYAGARI, S. B. *Artificial neural network based fault location for transmission lines*. 2011.
- BARNETT, P. S. The analysis of travelling waves on power system transmission lines. University of Canterbury. Electrical Engineering, 1974.
- BEWLEY, L. V. *Traveling waves on transmission systems*. [S.l.]: Dover, 1963.
- BEZERRA, R. d. C. et al. Estudo para aumento da confiabilidade de isoladores poliméricos nas linhas de transmissão da eletronorte. *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (III.: maio 2010: Belém, Pará)*. *Anais eletrônicos, Belém: UFPA*, 2010.

- BLOOMFIELD, P. *Fourier analysis of time series: an introduction*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2004.
- BOLLEN, M. H.; GU, I. *Signal processing of power quality disturbances*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2006. v. 30.
- BOUTHIBA, T. Fault location in ehv transmission lines using artificial neural networks. *International Journal of Applied mathematics and computer science*, v. 14, p. 69–78, 2004.
- BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M.; REINSEL, G. C. *Time Series Analysis*. [S.l.: s.n.], 2008.
- BRAGA, D. d. O. M. *Previsão de cargas elétricas a curto prazo por combinação de previsões via regressão simbólica*. 2017.
- BRETAS, A. S. et al. A novel high impedance fault location for distribution systems considering distributed generation. In: IEEE. *Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006. TDC'06. IEEE/PES*. [S.l.], 2006. p. 1–6.
- BROUGHTON, S. A.; BRYAN, K. *Discrete Fourier analysis and wavelets: applications to signal and image processing*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008.
- BUDNER, A. Introduction of frequency-dependent line parameters into an electromagnetic transients program. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 1, p. 88–97, 1970.
- CANTANHEDA, S. S. T. *Localização de Falhas em Linhas de Transmissão o por meio de Ondas Viajantes*. 2014.
- CANTANHEDA, S. S. T. *Sequência de Inserção dos Parâmetros das Linhas de Transmissão no Software ATP*. 2014.
- CAVALCANTE, P. A. H. *Localização de faltas em linhas de transmissão usando morfologia matemática*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2011.
- CEPEL Análise de Perturbações em Sistemas Elétricos. 2017. Disponível em: <<http://www.cepel.br/linhas-de-pesquisa/menu/analise-de-perturbacoes-em-sistemas-eletricos.htm>>. Acesso em: 30 jun. 2017.
- CLEVELAND, R. B. et al. A season-trend decomposition procedure based on loess. *Journal of Official Statistics*, Statistcs Sweden, v. 6, n. 1, p. 3–73, 1990.
- COMON, P. Independent component analysis, a new concept? *Signal processing*, Elsevier, v. 36, n. 3, p. 287–314, 1994.
- CORDEIRO, P. R. L. et al. *Algoritmo para Detecção, Localização e Classificação de Distúrbios Relacionados a Qualidade de Energia Utilizando a Transformada Wavelet*. Tese (Doutorado) — USP, 2007.
- COSTA, F. B.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D. A wavelet-based method for detection and classification of single and crosscountry faults in transmission lines. In: *International Conference on Power Systems Transients*. [S.l.: s.n.], 2009.

- COSTA, F. B.; SOUZA, B. A.; BRITO, N. S. D. Effects of the fault inception angle in fault-induced transients. *IET generation, transmission & distribution*, IET, v. 6, n. 5, p. 463–471, 2012.
- COTOSCK, K. R. Proteção de sistemas elétricos: uma abordagem técnico-pedagógica. UFMG, 2007.
- COURY, D. *Um estimador ótimo aplicado à proteção dos sistemas elétricos de potência*. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado)—Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1987.
- COX, D. R.; STUART, A. Some quick sign tests for trend in location and dispersion. *Biometrika*, JSTOR, v. 42, n. 1/2, p. 80–95, 1955.
- DALSTEIN, T.; KULICKE, B. Neural network approach to fault classification for high speed protective relaying. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 10, n. 2, p. 1002–1011, 1995.
- DOMMEL, H. W. Digital computer solution of electromagnetic transients in single-and multiphase networks. *IEEE transactions on power apparatus and systems*, IEEE, n. 4, p. 388–399, 1969.
- ELHAFFAR, A.; LEHTONEN, M. An improved gps current traveling-wave fault locator in ehv transmission networks using few recordings. *Proceedings of international conference on future power systems, Schiphol-Amsterdam, Netherlands*, p. 1–5, 2005.
- FERNANDEZ, R. M. C.; ROJAS, H. N. D. An overview of wavelet transforms applications in power systems. *14^o PSCC - Sevilla, Espanha*, p. 1–8, 2002.
- FERREIRA, V. et al. A survey on intelligent system application to fault diagnosis in electric power system transmission lines. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 136, p. 135–153, 2016.
- FERREIRA(Org), P. G. C. *Análise de Séries Temporais em R: curso introdutório*. [S.l.]: Elsevier, 2018.
- FILHO, J. M.; MAMEDE, D. R. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000.
- FLEET, P. J. V. *Discrete wavelet transformations: An elementary approach with applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008.
- FONSECA, H. L. C. A. D.; LEAL, M. F. *Análise de Transitórios Eletromagnéticos utilizando o ATPDraw*. 2003.
- FORMIGA, D. A. *Estimação de Fasores para Proteção de Sistemas Elétricos Baseada em Mínimos Quadrados e Morfologia Matemática*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.
- GASPAR, W. A. et al. Modified successive geometric segmentation method applied to power transformers faults diagnosis. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, Springer, v. 26, n. 2, p. 159–169, 2015.

- GIRGIS, A. A. A new kalman filtering based digital distance relay. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 9, p. 3471–3480, 1982.
- GONÇALVES, L. A. *Um Estudo sobre a Transformada Rápida de Fourier e seu uso em Processamento de Imagens*. 2011.
- GONTIJO, H. D. de O. Automação do processo de detalhamento de torres metálicas via tecnologia cad. UFMG, 2010.
- HANNAN, E. Testing for autocorrelation and akaike's criterion. *Journal of Applied Probability*, Cambridge University Press, v. 19, n. A, p. 403–412, 1982.
- HANNAN, E. J. The estimation of the order of an arma process. *The Annals of Statistics*, JSTOR, p. 1071–1081, 1980.
- HE, Z. et al. A novel traveling-wave directional relay based on apparent surge impedance. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 30, p. 1153–1161, 2015.
- HÉRAULT, J.; JUTTEN, C.; ANS, B. Détection de grandeurs primitives dans un message composite par une architecture de calcul neuromimétique en apprentissage non supervisé. In: GRETSI, GROUPE D ETUDES DU TRAITEMENT DU SIGNAL ET DES IMAGES. *10 Colloque sur le traitement du signal et des images, FRA, 1985*. [S.l.], 1985.
- HESSE, M. H. Eletromagnetic and eletrostatic transmission-line parameters by digital computer. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. 32, 1961.
- HOROWITZ, S. H.; PHADKE, A. G. *Power system relaying*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008. v. 22.
- HURVICH, C. M.; TSAI, C.-L. Regression and time series model selection in small samples. *Biometrika*, Oxford University Press, v. 76, n. 2, p. 297–307, 1989.
- IRWIN, J. D. *Análise de circuitos em engenharia*. [S.l.]: Pearson Education do Brasil, 2010.
- JUTTEN, C. Independent components analysis versus principal components analysis. *Signal Processing IV, Theories and Applications (EUSIPCO'88) Grenoble, France*, p. 643–646, 1988.
- JUTTEN, C.; HERAULT, J. Blind separation of sources, part i: An adaptive algorithm based on neuromimetic architecture. *Signal processing*, Elsevier, v. 24, n. 1, p. 1–10, 1991.
- KEZUNOVIC, M. Practical applications of automated fault analysis. In: IEEE. *Power System Technology, 2000. Proceedings. PowerCon 2000. International Conference on*. [S.l.], 2000. v. 2, p. 819–824.
- KEZUNOVIC, M.; RIKALO, I.; SOBASIC, D. J. Real-time and off-line transmission line fault classification using neural networks. Citeseer, 1996.
- KOSOW, I. L. *Máquinas elétricas e transformadores*. [S.l.]: Globo, 1985.

- LEÃO, R. P. S. Linhas de transmissão de energia elétrica - aula 20. *Projeto e Instalações Elétricas Prediais. Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC - Notas de aula*, IFSC, v. 3, p. 1–55, 2012.
- LEMOS, J. R. F. *Modelagem de Linhas de Transmissão para estudos de Transitórios Eletromecânicos*. Tese (Doutorado) — UFRJ, 2008.
- LIN, Y.-H.; LIU, C.-W.; CHEN, C.-S. A new pmu-based fault detection/location technique for transmission lines with consideration of arcing fault discrimination-part i: theory and algorithms. *IEEE Transactions on power delivery*, IEEE Transactions on Power Delivery, v. 19, n. 4, p. 1587–1593, 2004.
- MARTI, J. R. Accurate modeling of frequency dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, p. 1475–155, 1982.
- MCGINN, D.; JOHNSON, D. Reduction of all-pole parameter estimator bias by successive autocorrelation. In: IEEE. *Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on ICASSP'83*. [S.l.], 1983. v. 8, p. 1088–1091.
- MEYER, W. S.; DOMMEL, H. W. Numerical modelling of frequency-dependent transmission-line parameters in an electromagnetic transients program. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 5, p. 1401–1409, 1974.
- MILLER, T.; LIBERATORE, M. Seasonal exponential smoothing with damped trends: An application for production planning. *International Journal of Forecasting*, Elsevier, v. 9, n. 4, p. 509–515, 1993.
- MME. Grupo de trabalho portaria mme n.º 435/2009. *Ministério de Minas e Energia*, 2009.
- MONTGOMERY, D. C.; JENNINGS, C. L.; KULAHCI, M. *Introduction to Time Series Analysis and Forecasting*. [S.l.: s.n.], 2015.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C.; CALADO, V. *Estatística Aplicada E Probabilidade Para Engenheiros*. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000.
- MORETO, M.; ROLIM, J. G. Automated analysis of digital fault recorder data in power generating plants. *International Journal of Innovations in Energy Systems and Power*, v. 3, n. 2, p. 1–6, 2008.
- MORETO, M.; ROLIM, J. G. Análise automática de oscilografias em sistemas elétricos de potência. *Revista Controle & Automação, Porto Alegre*, v. 21, n. 4, p. 347–362, 2010.
- MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. *Análise de séries temporais*. [S.l.]: Blucher, 2006.
- NERI, T. F. *Proteção de Perda de Sincronismo—Aplicação e Avaliação no Sistema Interligado Nacional Brasileiro*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.
- NGU, E.; RAMAR, K. A combined impedance and traveling wave based fault location method for multi-terminal transmission lines. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, v. 33, p. 1767–1775, 2011.

- PAITHANKAR, Y. G.; BHIDE, S. *Fundamentals of power system protection*. [S.l.]: PHI Learning Pvt. Ltd., 2010.
- PEREIRA, S. et al. *Transformada wavelet aplicada a análise automática de oscilografias de curta duração em unidades geradoras*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.
- PHADKE, A. G.; THORP, J. S. *Computer relaying for power systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.
- PIERCE, D. A. Seasonal adjustment when both deterministic and stochastic seasonality are present. In: *Seasonal analysis of economic time series*. [S.l.]: NBER, 1979. p. 242–280.
- PROTZEK, B. R. Isoladores poliméricos. materiais elétricos: Compêndio de trabalhos. *Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Foz do Iguaçu, p. 27*, 2010.
- RAMO, S.; WHINNERY, J. R.; DUZER, T. V. *Campos e Ondas em Eletrônica das Comunicações*. [S.l.: s.n.].
- RAYBOLT, A. C. D. S. *Localização de Falhas em Linhas de Transmissão em Circuito Duplo Utilizando Redes Neurais Artificiais*. Tese (Doutorado) — Master s Thesis, COPPE–UFRJ–Brasil, 2011.
- RISSANEN, J. Modeling by shortest data description. *Automatica*, Elsevier, v. 14, n. 5, p. 465–471, 1978.
- ROBERTSON, D. C. et al. Wavelets and electromagnetic power system transients. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 13, p. 1150–1158, 1996.
- RODRIGUES, M. A. P. et al. Sistema para análise automática de oscilogramas na Light. *VII Seminário Técnico de Proteção e Controle*, 2003.
- SACHDEV, M.; BARIBEAU, M. A new algorithm for digital impedance relays. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 6, p. 2232–2240, 1979.
- SCHWARZ, G. et al. Estimating the dimension of a model. *The annals of statistics*, Institute of Mathematical Statistics, v. 6, n. 2, p. 461–464, 1978.
- SEDIGHI, A.-R.; HAGHIFAM, M.-R.; MALIK, O. Soft computing applications in high impedance fault detection in distribution systems. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 76, n. 1, p. 136–144, 2005.
- SHIMAMURA, T.; NGUYEN, N. D. Autocorrelation and double autocorrelation based spectral representations for a noisy word recognition system. In: *Eleventh Annual Conference of the International Speech Communication Association*. [S.l.: s.n.], 2010.
- SILVA, C. M. L.; LOPES, R. V. F.; KUGA, H. K. Joint estimation of orbit and a joint estimation of orbit and attitude of spin stabilized artificial satellites using magnetometer and solar sensors measurements. *convergence*, DINCON, v. 2, p. 4, 2006.
- SILVA, V. L. P. da. *Identificação de Anomalias em Fluxos de Rede utilizando Previsões em Séries Temporais pelo Método Holt-Winters*. 2015.

- SILVEIRA, P. M.; SEARA, R.; ZURN, H. H. Localização de faltas por ondas viajantes - uma nova abordagem baseada em decomposição wavelet. *XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia*, 2001.
- SIMAS, E. Extração de características - aula 08. *Curso de Engenharia Elétrica. Universidade Federal da Bahia - UFBA - Notas de aula*, p. 1–20, 2012.
- SINDAT - Sistema de Informações Geográficas do SIN. 2017. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/pt/paginas/sobre-o-sin/mapas>>. Acesso em: 17 jun. 2017.
- SNELSON, J. Propagation of travelling waves on transmission lines-frequency dependent parameters. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 1, p. 85–91, 1972.
- SOLIMAN, S.; EL-HAWARY, M. Application of kalman filtering for online estimation of symmetrical components for power system protection. *Electric power systems research*, Elsevier, v. 38, n. 2, p. 113–123, 1996.
- SOUZA, D. P. M. de; CHRISTO, E. da S.; ALMEIDA, A. R. Estudo de sinais transitórios em linhas de transmissão por modelos de séries temporais. In: UNIFOA. *Anais do XI Colóquio Técnico Científico do UniFOA: Exatas e Engenharias (ISBN: 978-85-5964-087-8)*. [S.l.], 2017. v. 1, p. 50–50.
- SOUZA, D. P. M. de; CHRISTO, E. da S.; ALMEIDA, A. R. Localização de faltas em linhas de transmissão por séries temporais. In: SBMAC. In: *XXXVII Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional (CNMAC). Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics. São José dos Campos*. [S.l.], 2017. v. 1, p. 250–254.
- SOUZA, D. P. M. de; CHRISTO, E. da S.; ALMEIDA, A. R. Location of faults in power transmission lines using the ARIMA method. *Energies*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 10, p. 1596, 2017.
- SOUZA, D. P. M. de; CHRISTO, E. da S.; ALMEIDA, A. R. Séries de fourier aplicadas à localização de faltas em linhas de transmissão de energia elétrica. In: UFF. *Anais do III Simpósio de Matemática da Região Sul Fluminense (SIMMA/UFF), Rio de Janeiro, Brazil*. [S.l.], 2017. v. 1, p. 495–496.
- SOUZA, D. P. M. de et al. Estudo de sinais transitórios em linhas de transmissão de energia por análise de função de autocorrelação. In: UFF. *Anais do IV Simpósio de Matemática da Região Sul Fluminense (SIMMA/UFF), Rio de Janeiro, Brazil*. [S.l.], 2018. v. 1, p. 201–204.
- SOUZA, D. P. M. de et al. Fault location in power transmission lines using autocorrelation function. (*IJAERS*, International Journal of Advanced Engineering Research and Science, v. 5, n. 5, p. 296–304, 2018).
- SOUZA, R.; CAMARGO, M. *Análise de Séries Temporais: os modelos ARIMA*. [S.l.]: Gráfica e Editora Regional, Rio de Janeiro, 2004.

- SOUZA, S. C. A. et al. Uso de redes neurais artificiais e transformada de stockwell na localização de faltas em linhas de transmissão. *Grupo de Pesquisa em Automação e Robótica - GPAR UFC, Grupo de Pesquisa em Automação do Sistema Elétrico - GPASE, UFPI, UFC*, v. 1, n. 1, p. 1–6, 2015.
- SOUZA, S. C. A. d. *Uso de redes neurais artificiais e transformada de Stockwell na localização de faltas em linhas de transmissão*. 2015.
- SOUZA, T. B. P. *Análise de Ondas Viajantes em Linhas de Transmissão para Localização de Faltas: Abordagem via Transformada Wavelet*. Tese (Doutorado) — Dissertação de Mestrado, UFPA, 2007.
- STOREY, B. D. Computing Fourier series and power spectrum with matlab. *TEX Paper*, 2002.
- STYVAKTAKIS, E.; BOLLEN, M. H.; GU, I. Y. Automatic classification of power system events using rms voltage measurements. In: IEEE. *Power Engineering Society Summer Meeting, 2002 IEEE*. [S.l.], 2002. v. 2, p. 824–829.
- SUNDARAVARADAN, N. et al. Wavelet based transmission line fault analysis: A literature survey. In: IEEE. *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2014 14th International Conference on*. [S.l.], 2014. p. 254–259.
- TAKAGI, T. et al. A new algorithm of an accurate fault location for ehv/uhv transmission lines: Part ii-laplace transform method. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 3, p. 564–573, 1982.
- TAKAGI, T. et al. A new algorithm of an accurate fault location for ehv/uhv transmission lines: Part ii-laplace transform method. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 3, p. 564–573, 1982.
- THUKARAM, D.; KHINCHA, H. P.; VIJAYNARASIMHA, H. P. Artificial neural network and support vector machine approach for locating faults in radial distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 20, n. 2, p. 710–721, 2005.
- TORRES, I. O. Identificação e estimação de modelos arma com inovações alpha-estáveis. 2016.
- UZUBI, U.; EKWUE, A.; EJIOGU, E. Artificial neural network technique for transmission line protection on nigerian power system. In: IEEE. *PowerAfrica, 2017 IEEE/PES*. [S.l.], 2017. p. 52–58.
- VALINS, T. F. *Relé Digital de Distância Baseado na Teoria de Ondas Viajantes e Transformada de Wavelet*. 2005.
- VÁZQUEZ, E. et al. A new approach traveling wave distance protection. part i: Algorithm. *IEEE Transactions on Power Deliver*, IEEE, v. 22, n. 2, p. 795–800, 2007.
- VÁZQUEZ-MARTÍNEZ, E. A travelling wave distance protection using principal component analysis. *International journal of electrical power e energy systems*, Elsevier, v. 25, n. 6, p. 471–479, 2003.

VELASCO, R. P. Development of mathematical models for three phase medium transmission lines. *International Journal of Applied Physics and Mathematics*, IACSIT Press, v. 3, n. 4, p. 260, 2013.

VISACRO, S. *Descargas Atmosféricas: Uma abordagem de Engenharia*. 1. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2005.

YAFFEE, R.; MCGEE, M. *Introduction to Time Series Analysis and Forecasting*. [S.l.: s.n.].

YOUSSEF, O. A. S. Fault classification based on wavelet transforms. In: IEEE. *Proceedings of 2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*. [S.l.], 2001. p. 531–536.

ZANETTA, J. *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*. [S.l.]: Edusp, 2003.