

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

ESCOLA DE ENGENHARIA

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

RIANI DA BOA MORTE SILVA

AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS PARA DETECÇÃO DE EVENTOS EM SISTEMAS DE
POTÊNCIA

NITERÓI, RJ

2015

RIANI DA BOA MORTE SILVA
MATRÍCULA: M054.213.011

AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS PARA DETECÇÃO DE EVENTOS EM SISTEMAS DE
POTÊNCIA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador: Prof. Vitor Hugo Ferreira, D. Sc.

Niterói, RJ

2015

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e Instituto de Computação da UFF

RIANI DA BOA MORTE SILVA

AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS PARA DETECÇÃO DE EVENTOS EM SISTEMAS DE
POTÊNCIA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações
da Universidade Federal Fluminense, como requisito
parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia
Elétrica e de Telecomunicações.

Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Aprovado em ___/___/___.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Vitor Hugo Ferreira, D.Sc.

Universidade Federal Fluminense

Prof. Marcio Zamboti Fortes, Dr.

Universidade Federal Fluminense

Prof. Marcus Theodor Schilling, D.Sc.

Universidade Federal Fluminense

Niterói, RJ

2015

Dedico este trabalho à minha família que sempre foi meu suporte para encarar as adversidades da vida.

AGRADECIMENTOS

Meu primeiro agradecimento sempre será a Deus, a força que me mantém de pé todos os dias. Sem Ele nada faz sentido.

Agradeço à minha família que mesmo não estando fisicamente perto por muitas vezes, esteve mais próxima do que nunca. Todos eles eu carrego no meu coração por todo o tempo da minha vida.

Agradeço ao meu noivo, Guilherme, pelo companheirismo de sempre, por ser a pessoa que me encoraja a alcançar meus objetivos e me acalma nas horas que preciso.

Em especial, agradeço ao meu orientador e eterno professor Vitor Hugo Ferreira, pela paciência, pelos diversos ensinamentos ao longo destes anos de UFF e por acreditar no meu potencial. Sua paixão por ensinar se faz nítida em qualquer contato que tenhamos. Um excelente professor e uma pessoa do bem que dá prazer estar perto.

Agradeço ao ilustre professor Marcio Zambotti Fortes, meu conterrâneo, o professor que faz seus alunos olharem além, o professor que ensinou muito sobre a vida acadêmica, mas também sobre a vida profissional, aquele que me fez aprender a fazer artigos acadêmicos e apresentações de qualidade.

Agradeço ao querido professor Marcus Theodor Schilling pela honra de participar pela segunda vez da banca de avaliação do meu trabalho. Uma figura ímpar que guardo com muito carinho no coração.

Meu muito obrigada a todos vocês que se fizeram importantes ao longo da minha trajetória acadêmica. Mais um ciclo se encerra aqui e, em breve, outros iniciarão.

“Se deseja vencer, aprenda a sorrir além do cansaço. Esperança vitoriosa é aquela que não deixa de trabalhar.”

Francisco Cândido Xavier - Emmanuel

RESUMO

Manter a qualidade na prestação do serviço de transmissão de energia elétrica no setor elétrico brasileiro tem sido um dos desafios das empresas do ramo devido à alta complexidade do sistema. Neste cenário, cresce a importância e o interesse por sistemas de suporte à tomada de decisão que contribuam para melhoria do processo de diagnóstico de falhas em linhas de transmissão promovendo o restabelecimento célere da função em questão. No âmbito de média e baixa tensão que tange às distribuidoras de energia, o aumento no uso de equipamentos computadorizados altamente sensíveis às perturbações do sistema elétrico tem levado a exigências cada vez mais rigorosas na qualidade da energia fornecida ao consumidor. Com intuito de melhorar a qualidade do serviço de fornecimento de energia aos consumidores, cresce o interesse em sistemas de monitoramento em tempo real capazes de identificar sinais de diferentes eventos e tomar as decisões apropriadas para a mudança e manutenção do sistema. Neste cenário, este trabalho tem o objetivo de apresentar, implementar e avaliar técnicas promissoras de inteligência computacional e métodos estatísticos para detecção automática de eventos em sistemas de potência. Três métodos foram avaliados, são eles: rede neural com inferência *Bayesiana* aplicada no treinamento de perceptrons de múltiplas camadas; filtro de Kalman e operador de energia de Teager. Para validar e comparar os métodos são utilizadas bases de dados geradas sinteticamente, tanto para o caso da transmissão quanto para distribuição. Sendo a primeira formada por dados simulados no aplicativo *Alternative Transient Program* e a segunda gerada através de formulações matemáticas. Os critérios utilizados para avaliar a ferramenta de melhor desempenho consistiram na análise do erro médio entre o instante de tempo detectado e o real instante de início do evento e a avaliação do tempo de simulação computacional. Neste sentido, para o problema de transmissão, a técnica baseada em Filtro de Kalman destacou-se em relação às outras técnicas avaliadas quando da análise do erro de estimação. Em contrapartida, o método mais rápido na detecção de eventos em sistema de transmissão foi o baseado no Operador de Teager. Por outro lado, no sistema de distribuição, a técnica de detecção automática baseada em Inferência Bayesiana obteve melhores resultados quando da análise do erro de estimação. No entanto, o Operador de Energia de Teager permaneceu sendo o mais rápido, haja vista a simplicidade dos cálculos envolvidos.

Palavras-chave: Detecção de eventos em sistemas de potência, inferência Bayesiana, filtro de Kalman, operador de energia de Teager, qualidade de energia.

ABSTRACT

Keep the quality in the supply of electricity transmission services in the Brazilian electrical system has been one of the challenges of companies in the industry due to the high complexity of the system. In this scenario, the growing importance and interest in decision-making support systems that contribute to improved fault diagnosis process in transmission lines promoting the quick recovery of function in question. The medium and low voltage respect to energy distributors, the increased use of highly sensitive computerized equipment to power system disturbances has led to increasingly stringent requirements on the quality of energy supplied to the consumer. Aiming to improve the quality of power supply service to consumers, growing interest in monitoring real-time systems able to identify signals of different events and take appropriate decisions to system's changing and maintenance. In this scenario, this study aims to present, implement and evaluate promising computational intelligence techniques and statistical methods to automatically detect events in power systems. Three methods were evaluated, they are: neural network with Bayesian inference applied in training perceptrons multilayer; Kalman filtering and Teager energy operator. To validate and compare methods, synthetically generated data bases are used both for the case of data transmission and distribution. The first being formed by simulated data in the application Alternative Transient Program and the second generated through mathematical formulations. The criteria used to assess the best performing tool was the standard deviation analysis of the error between the detected instant of time and the real one and the evaluation of the computational simulation time. These two variables become important to set the detector application. In this sense, for the transmission problem, the technique based on Kalman filtering stood out compared to other techniques evaluated analysing the estimation error standard deviation. The fastest method for event detection in transmission system was based on Teager operator. In the other hand, in the distribution system, automatic detection technique based on Bayesian inference got better results when analysing the estimation error standard deviation. However, the Teager's Energy Operator remained the fastest, given the simplicity of the calculations involved.

Keywords: Event detection in power systems, Bayesian inference, Kalman filtering, Teager energy operator, power quality.

SUMÁRIO

1.	Introdução.....	1
1.1.	Motivação	1
1.2.	Objetivo	2
1.3.	Estrutura do documento	3
2.	Detecção de eventos em sistemas de potência	4
2.1.	Tipos de eventos	4
2.1.1.	Eventos de qualidade de energia.....	4
2.1.1.1.	Transitórios	5
2.1.1.2.	Variações de tensão de curta duração	6
2.1.1.3.	Variações de tensão de longa duração	7
2.1.1.4.	Deformação da forma de onda da tensão	7
2.1.1.5.	Desbalanceamentos trifásicos	8
2.1.2.	Eventos de falta – curto-circuito.....	8
2.1.3.	Energização de transformador	8
2.1.4.	Partida de cargas especiais.....	9
2.2.	Métodos de representação de eventos.....	9
2.3.	Estado da arte sobre métodos de detecção de eventos.....	14
2.3.1.	Técnicas de processamento de sinal	17
2.3.2.	Métodos estatísticos.....	18
2.3.3.	Técnicas de aprendizado de máquina	18
3.	Técnicas inteligentes para análise de eventos	23
3.1.	Operador de energia de Teager.....	23
3.2.	Filtro de Kalman	24
3.3.	Modelos Neurais Autônomos	28
4.	Materiais e métodos.....	36
4.1.	Descrição do sistema de transmissão simulado no ATP.....	36

4.1.1.	Base de dados	38
4.1.2.	Rede elétrica equivalente	38
4.1.1.	Sobre o programa de detecção de faltas em linhas de transmissão no Matlab	39
4.2.	Descrição dos casos de qualidade de energia simulados no Matlab	41
4.3.	Descrição das especificações necessárias para as técnicas utilizadas.....	41
4.3.1.	Sistema de transmissão no ATP	41
4.3.1.1.	Linhas de transmissão	42
4.3.1.1.	Transformadores	46
4.3.1.2.	Reatores.....	47
4.3.1.3.	Unidades geradoras	47
4.3.1.4.	Equivalentes	48
4.3.2.	Geração sintética das oscilografias no Matlab.....	51
4.3.2.1.	Tipo de falta	51
4.3.2.2.	Localização da falta	52
4.3.2.3.	Resistência de falta.....	53
4.3.2.4.	Ângulo de incidência da falta (fase da tensão no momento da falta)	53
4.3.2.5.	Ponto de operação do sistema	54
4.3.3.	Eventos de qualidade de energia no Matlab	57
4.3.3.1.	Sag.....	58
4.3.3.2.	Swell.....	58
4.3.3.3.	Sag com Harmônicos	58
4.3.3.4.	Swell com Harmônicos	58
4.4.	Parametrizações dos algoritmos utilizados	58
4.4.1.	Parâmetros utilizados na Rede Neural	59
4.4.2.	Parâmetros do Operador de Energia de Teager	60
4.4.3.	Parâmetros do Filtro de Kalman	60

5.	Resultados.....	62
5.1.	Oscilografias geradas nas simulações.....	62
5.1.1.	Sistema de transmissão	62
5.1.2.	Sistema de distribuição	73
5.2.	Descrição dos resultados obtidos e análise crítica	75
5.2.1.	Detecção de evento no sistema de transmissão	75
5.2.2.	Detecção de evento no sistema de distribuição	78
6.	Conclusões.....	81
6.1.	Recomendações para trabalhos futuros.....	83
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Formas de onda de tensão de transitórios impusivos	6
Figura 2.2 - Formas de onda de tensão de transitórios oscilatórios.....	6
Figura 2.3 - Variações de tensão de curta duração: (a) afundamento de tensão; (b) elevação de tensão; (c) interrupção	7
Figura 2.4 - Deformação da forma de onda de tensão: (a) harmônicos; (b) notches.....	8
Figura 3.1 - Exemplo de segmentação para modelos utilizando operador de energia de Teager. Cálculo de $\psi[x(n)]$ (a) seguindo da limiarização através da determinação empírica do limiar; (b) suavização; (c) da limiarização apresentada em (b) [32]	24
Figura 3.2 - Exemplos de segmentação para modelos utilizando Filtro de Kalman. Cálculo dos resíduos do sinal (a), seguido da limiarização através do cálculo automático do limiar (b). Suavização (c) da limiarização apresentada em (b)	28
Figura 4.1 - Configuração da rede adotada nos estudos de transitórios eletromagnéticos	40
Figura 4.2– Representação geométrica das LTs 500 kV T. Preto – C. Paulista C1 e C2	46
Figura 5.1 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada na fase A	62
Figura 5.2 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada na fase B	63
Figura 5.3 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada na fase C	63
Figura 5.4 - Oscilografia de tensões trifásicas com falta aplicada na fase A	63
Figura 5.5 - Oscilografia de corrente monofásica com falta aplicada na fase A	64
Figura 5.6 - Oscilografia de correntes trifásicas com falta aplicada na fase A.....	64
Figura 5.7 - Oscilografia de tensões e correntes trifásicas com falta aplicada na fase A	64
Figura 5.8 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada entre as fases A e B	65
Figura 5.9 - Oscilografia de corrente monofásica com falta aplicada entre as fases A e B	65
Figura 5.10 - Oscilografia de tensões e correntes trifásicas com falta aplicada entre as fases A e B.....	65
Figura 5.11 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada entre as fases B e C	66

Figura 5.12 - Oscilografia de corrente monofásica com falta aplicada entre as fases B e C	66
Figura 5.13 - Oscilografia de correntes e tensões trifásicas com falta aplicada entre as fases B e C	66
Figura 5.14 - Oscilografia de correntes e tensões trifásicas com falta aplicada entre as fases A, B e C	67
Figura 5.15 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada entre as fases A e B e Terra	67
Figura 5.16 - Oscilografia de corrente monofásica com falta aplicada entre as fases A e B e Terra	67
Figura 5.17 - Oscilografia de correntes e tensões trifásicas com falta aplicada entre as fases A e B e Terra	68
Figura 5.18 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada entre as fases B e C e Terra	68
Figura 5.19 - Oscilografia de corrente monofásica com falta aplicada entre as fases B e C e Terra	68
Figura 5.20 - Oscilografia de tensões e correntes trifásicas com falta aplicada entre as fases B e C e Terra.....	69
Figura 5.21 - Oscilografia de tensões e correntes trifásicas com falta aplicada entre as fases A,B e C e Terra.....	69
Figura 5.22 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada entre as fases A,B e C e Terra no terminal da LT monitorada. Detalhe para o instante de percepção do defeito.	70
Figura 5.23 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada entre as fases A,B e C e Terra no meio da LT monitorada. Detalhe para o instante de percepção do defeito.....	70
Figura 5.24 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada entre as fases A,B e C e Terra no terminal da LT monitorada. Detalhe para o instante de percepção do defeito.	71
Figura 5.25 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada entre as fases A,B e C e Terra em LT externa à monitorada. Detalhe para o instante de percepção do defeito.	71
Figura 5.26 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada entre as fases A,B e C e Terra com resistência de falta = 0Ω . Detalhe para o instante de percepção do defeito. .	71
Figura 5.27 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada entre as fases A,B e C e Terra com resistência de falta = 5Ω . Detalhe para o instante de percepção do defeito. .	72
Figura 5.28 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada entre as fases A,B e C e Terra com resistência de falta = 20Ω . Detalhe para o instante de percepção do defeito.	72

Figura 5.29 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada entre a fase A e Terra com resistência de falta = 0Ω . Detalhe para o instante de percepção do defeito.....	72
Figura 5.30 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada entre fase A e Terra com resistência de falta = 5Ω . Detalhe para o instante de percepção do defeito.....	73
Figura 5.31 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada entre fase A e Terra com resistência de falta = 20Ω . Detalhe para o instante de percepção do defeito.....	73
Figura 5.32 – Oscilografia de tensões trifásicas com afundamento de tensão	74
Figura 5.33 - Oscilografia de tensões trifásicas com sobretensão	74
Figura 5.34 - Oscilografia de tensões trifásicas com harmônicos e afundamento de tensão	74
Figura 5.35 - Oscilografia de tensões trifásicas com harmônicos e sobretensão.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 - Características de distúrbios de qualidade de energia (adaptado de [3]) ...	5
Tabela 2-2 - Possíveis causas de alguns eventos de qualidade de energia (adaptado de [4])	11
Tabela 4-1 - Validação da modelagem da rede no ATP: Comparação dos níveis de curto-circuito	39
Tabela 4-2 – Equações algébricas dos distúrbios (adaptado de [37]).....	42
Tabela 4-3 – Dados das linhas de transmissão	43
Tabela 4-4 – Dados das linhas de transmissão (continuação)	44
Tabela 4-5 – Características básicas das linhas de transmissão 500kV Tijuco Preto – Cachoeira Paulista	45
Tabela 4-6– Características geométricas das torres de transmissão das LTs 500kV Tijuco Preto – Cachoeira Paulista	45
Tabela 4-7– Dados dos transformadores	46
Tabela 4-8 – Dados dos reatores de linha de transmissão	48
Tabela 4-9 - Dados dos reatores de barra	48
Tabela 4-10 - Dados das unidades geradoras	48
Tabela 4-11 – Dados dos equivalentes próprios	49
Tabela 4-12– Dados das impedâncias de transferência	50
Tabela 4-13– Dados das impedâncias de transferência (continuação)	51
Tabela 4-14 – Representação dos tipos de falta gerados	55
Tabela 4-15 - Representação da localização da falta.....	55
Tabela 4-16 - Representação da resistência de falta	56
Tabela 4-17 - Representação do instante de falta	56
Tabela 4-18 - Representação do ponto de operação do sistema	56
Tabela 4-19– Modelagem dos distúrbios (adaptado de [37])	57
Tabela 5-1 - Desempenho dos métodos de detecção de faltas em linha de transmissão	75
Tabela 5-2 - Desempenho do detector com Filtro de Kalman quando há variação do ponto de aplicação da falta com monitoramento de tensões trifásicas	77
Tabela 5-3 - Desempenho do detector com Filtro de Kalman quando há variação da resistência de falta nas faltas aplicadas internamente à LT com monitoramento de tensões trifásicas.....	77

Tabela 5-4 - Desempenho dos métodos de detecção de eventos de qualidade de energia	78
Tabela 5-5 - Desempenho do detector baseado em inferência Bayesiana.....	78
Tabela 5-6 - Desempenho do detector baseado em Filtro de Kalman.....	79
Tabela 5-7 - Desempenho do detector baseado no Operador de Energia de Teager	79

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ANAREDE	Análise de Redes Elétricas
ANAFAS	Análise de Falhas Simultâneas
ATP	Alternative Transient Program
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CPTe	Cachoeira Paulista Transmissora de Energia
EMTDC	Electromagnetic Transients including DC
EMTP	Electromagnetic Transients Program
FK	Filtro de Kalman
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LT	Linha de Transmissão
MATLAB	Matrix Laboratory
MLP	Multi-layer Perceptron
OET	Operador de Energia de Teager
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
PSCAD	Power Systems Computer Aided Design
pu	Grandeza por unidade
RAP	Receita Anual Permitida
RBF	Radial Basis Function
RNA	Rede Neural Artificial
SAPRE	Sistema de Análise e Projeto de Redes Elétricas

SE	Subestação
SVM	Support Vector Machine
UFF	Universidade Federal Fluminense

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

Sistemas de energia elétrica possuem alta complexidade devido aos seus inúmeros componentes, unidades geradoras, linhas de transmissão, subestações elevadoras/abaixadoras, distribuição, entre outros equipamentos diversos. Manter a qualidade na prestação do serviço de transmissão de energia elétrica no setor elétrico brasileiro tem sido um dos desafios das empresas do ramo. Na legislação brasileira estão previstos bônus para as empresas do setor de transmissão que disponibilizam seus serviços com taxas de indisponibilidade iguais ou inferiores às especificadas na Resolução 512/2012 [1] e, por outro lado, estão previstos ônus, através de descontos na Receita Anual Permitida – RAP, àquelas empresas que ultrapassarem certos índices de indisponibilidade, definidos na legislação e relacionados tanto com a frequência de desligamentos quanto com a duração de tais eventos. Estes indicadores foram estabelecidos na Resolução 270/2007 [2] e atualizados em 2012 por meio da Resolução 512/2012 [1].

Estas questões evidenciam a necessidade de ferramentas robustas para gestão técnica de instalações de transmissão visando reduzir as taxas de indisponibilidade desta função, que além de reduzirem a qualidade na prestação do serviço ao consumidor final por meio da interrupção do fornecimento, oneram o empreendedor neste novo ambiente de negócios. Neste cenário, cresce a importância e o interesse por sistemas de suporte à tomada de decisão que contribuam para melhoria do processo de diagnóstico de falhas em linhas de transmissão promovendo o restabelecimento célere da função em questão.

No âmbito de média e baixa tensão que tange às distribuidoras de energia, o aumento no uso de equipamentos computadorizados altamente sensíveis às perturbações do sistema elétrico tem levado a exigências cada vez mais rigorosas na qualidade da energia elétrica fornecida ao consumidor. Ao mesmo tempo em que cresce a exigência por parte dos

consumidores de uma energia de melhor qualidade, as concessionárias de energia elétrica, por sua vez, se encontram numa situação delicada, visto que o aumento das cargas não-lineares provoca o aumento significativo da ocorrência de distúrbios nos seus sistemas de distribuição e a conseqüente perda da qualidade da energia elétrica entregue. Logo, é importante não somente fornecer energia sem interrupção, mas também manter as formas de onda senoidais de tensão e corrente, além de frequência e amplitude constantes de forma a garantir o funcionamento contínuo dos equipamentos. Baixa qualidade de energia pode ocasionar sérios problemas para as cargas afetadas, tais como curto ciclo de vida, avarias, instabilidades, interrupções. O principal motivo para o crescente interesse em qualidade de energia reside na grande economia de valores diretamente associados a esses distúrbios. No Brasil existe um esforço por parte do governo para a regulamentação dos padrões da qualidade de energia elétrica nos níveis de transmissão e distribuição, especialmente pode-se citar o PRODIST – Procedimentos de Distribuição, que contém os documentos regulatórios que descrevem alguns indicadores de desempenho e de qualidade dos serviços de energia elétrica.

Baixa qualidade de energia é normalmente caracterizada pela presença de distúrbios, tais como distorção harmônica, comutação de capacitor, faltas de alta impedância, correntes de energização de transformadores (corrente de *inrush*) e transitórios de partida de motores. Portanto, com intuito de melhorar a qualidade do serviço de fornecimento de energia aos consumidores, as empresas de distribuição de energia devem fornecer sistemas de monitoramento em tempo real capazes de identificar sinais de diferentes eventos e tomar as decisões apropriadas para a mudança e manutenção do sistema.

1.2. OBJETIVO

Este trabalho teve origem a partir do projeto de pesquisa e desenvolvimento “Sistema Inteligente para Diagnóstico de Faltas em Linhas de Transmissão”, integrante da carteira de projetos de P&D da ISOLUX Infrastructure LTDA, e desenvolvido em conjunto por pesquisadores da Universidade Federal Fluminense (UFF) e da Jordão Engenharia. Este projeto tem por objetivo o desenvolvimento de um sistema completo de diagnóstico de falha em linha de transmissão, incluindo módulos de detecção do início da falta, classificação do tipo e localização da falta em termos de distância à subestação. Neste contexto, esta Dissertação explora o módulo de detecção de eventos, sendo esses eventos caracterizados por faltas em linha de transmissão ou distúrbios de qualidade de energia tanto em linha de transmissão quanto em sistemas de distribuição.

Portanto, esta dissertação tem o objetivo de apresentar, implementar e avaliar técnicas promissoras de inteligência computacional e métodos estatísticos para detecção de distúrbios em sistemas de potência.

1.3. ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este documento está dividido em 6 capítulos, referências bibliográficas e anexos.

O capítulo 1, *INTRODUÇÃO*, apresenta a motivação e os objetivos do estudo, além da estrutura do mesmo.

O capítulo 2, *DETECÇÃO DE EVENTOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA*, descreve alguns métodos de detecção de eventos em sistemas de potência, apresentando os diversos tipos de eventos, os métodos de representação de eventos através do ATP e o estado da arte sobre métodos de detecção de falhas.

O capítulo 3, *TÉCNICAS INTELIGENTES PARA ANÁLISE DE EVENTOS*, descreve as principais técnicas inteligentes para análise de eventos em sistemas de transmissão e distribuição de energia.

O capítulo 4, *MATERIAIS E MÉTODOS*, apresenta os materiais utilizados para elaboração do estudo e aborda sobre as parametrizações e estatísticas dos métodos avaliados, além de apresentar os algoritmos a serem avaliados no trabalho prático.

No capítulo 5, *RESULTADOS*, encontram-se os principais resultados obtidos nas avaliações dos métodos propostos.

O capítulo 6, *CONCLUSÕES*, apresenta as conclusões do estudo realizado e, por fim, são feitas propostas de desenvolvimento de trabalhos futuros com sugestões para a continuidade deste.

2. DETECÇÃO DE EVENTOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

Neste capítulo, serão apresentados os principais distúrbios que podem ocorrer em um sistema elétrico, sendo abordados os principais métodos de representação de tais distúrbios e apresentada uma revisão do estado da arte sobre métodos de detecção de eventos.

2.1. TIPOS DE EVENTOS

Eventos de qualidade de energia podem ser classificados em duas principais categorias: eventos de falha e eventos de comutação. Os distúrbios de qualidade de energia como *Sag* (afundamento) ou Interrupção podem ocorrer depois de um evento de falta em fases defeituosas. Em contrapartida, *Swell* (sobretensão) pode ocorrer em fases sãs. Os eventos de comutação são os tipos de eventos que acontecem com maior frequência, dependendo das condições operacionais dos sistemas de energia. Distúrbios como *Sag*, Transitórios e Harmônicos podem acontecer no sistema após eventos de comutação. Geralmente, energização de transformador, comutação de banco de capacitores ou de carga, interrupção e energização de linha de transmissão são exemplos de eventos de comutação.

2.1.1. Eventos de qualidade de energia

De acordo com a norma do *IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers*, os diversos tipos de distúrbios em qualidade de energia se enquadram em 7 diferentes categorias: transitórios, variações de curta duração, variações de longa duração, desequilíbrios de tensão, distorções na forma de onda, flutuações de tensão e variações da frequência do sistema. A Tabela 2-1 mostra um resumo, baseado na norma do IEEE, das principais características dos principais distúrbios elétricos.

Tabela 2-1 - Características de distúrbios de qualidade de energia (adaptado de [3])

Evento	Transitórios		
Categoria	Conteúdo Espectral	Duração Típica	Amplitude Típica
Transitórios Impulsivos	Tempo de subida = [5 ns, 1 ms]	< 1 ms	-
Transitórios Oscilatórios	≤ 5 MHz	[5 μs, 50 ms]	[0; 8] pu
Evento	Variações de curta duração		
Categoria	Conteúdo Espectral	Duração Típica	Amplitude Típica
Sag (afundamento)	-	[0,5 ciclo, 1 min]	[0,1; 0,9] pu
Swell (sobretensão)	-	[0,5 ciclo, 1 min]	[1,1; 1,8] pu
Interrupção	-	< 1 min	< 0,1 pu
Evento	Variações de longa duração		
Categoria	Conteúdo Espectral	Duração Típica	Amplitude Típica
Subtensão	-	> 1 min	[0,8; 0,9] pu
Sobretensão	-	> 1 min	[1,1; 1,8] pu
Interrupção sustentada	-	> 1 min	0,0 pu
Evento	Variações de longa duração		
Categoria	Conteúdo Espectral	Duração Típica	Amplitude Típica
DC offset	-	Regime Permanente	[0; 0,1] %
Harmônicos	[0;100°] harmônico	Regime Permanente	[0; 0,1] %
Inter harmônicos	[0; 6] KHz	Regime Permanente	[0; 2] %
Notching	-	Regime Permanente	
Ruído	Toda banda	Regime Permanente	[0; 1] %
Evento	Outros distúrbios		
Categoria	Conteúdo Espectral	Duração Típica	Amplitude Típica
Desbalanceamento de tensão	-	Regime Permanente	[0,5; 2] %
Flutuação de tensão (Flicker)	< 25 KHz	Intermitente	[0,1; 7] %
Variações na frequência fundamental	-	< 10 s	-

2.1.1.1. Transitórios

O termo transitório é empregado para caracterizar a ocorrência de um evento de curta duração no sistema elétrico. Fenômenos transitórios ocorrem no sistema em função de diversas condições. Muitos transitórios são decorrentes de variações instantâneas na corrente, as quais interagem com a impedância do sistema, resultando em elevadas tensões instantâneas. Transitórios podem também ser consequência de cargas com operação intermitente, chaveamento de bancos de capacitores, faltas fase-terra, operação de dispositivos de semicondutores e falhas em condutores. Descargas atmosféricas são um caso especial de transitórios devido aos níveis extremamente altos de energia e intervalo de tempo bastante reduzido. Os tipos de transitórios são: impulsivos e oscilatórios.

Os transitórios impulsivos são causados por descargas atmosféricas e, geralmente, são caracterizados pelo tempo de subida e de descida do impulso. Sua definição pode ser dada por uma alteração repentina nas condições de regime permanente da tensão, corrente ou ambas, caracterizando-se por apresentar impulsos unidirecionais em polaridade (positivo ou negativo) e com frequência bastante diferente daquela da rede elétrica.

A Figura 2.1 mostra dois exemplos típicos de transitórios impulsivos gerados sinteticamente.

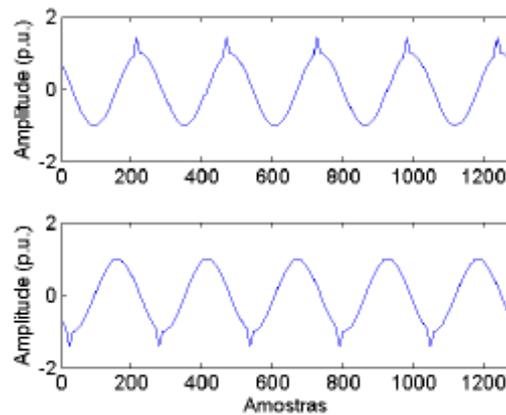


Figura 2.1 – Formas de onda de tensão de transitórios impulsivos

Os transitórios oscilatórios consistem em uma rápida variação nos valores e na polaridade da tensão e corrente. São decorrentes de energização de linhas, corte de carga indutiva, eliminação de faltas, chaveamento de bancos de capacitores e transformadores. A Figura 2.2 ilustra dois transitórios oscilatórios gerados sinteticamente.

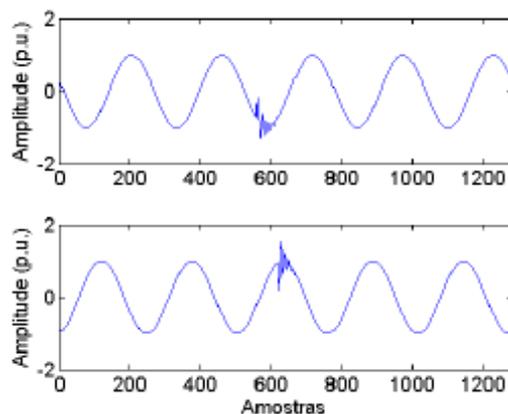


Figura 2.2 - Formas de onda de tensão de transitórios oscilatórios

2.1.1.2. Variações de tensão de curta duração

As variações de tensão de curta duração são caracterizadas pela elevação, ou redução da amplitude da tensão no sistema durante um curto intervalo de tempo. A redução da amplitude da tensão a valores inferiores a 0,1 p.u. caracteriza uma interrupção momentânea do sistema. Os limites de tempo de ocorrência e intervalo de variação da amplitude da tensão para estes eventos são mostrados na Tabela 2-1. Tais variações de tensão são, geralmente, causadas por condições de falta, energização de grandes cargas as quais requerem altas

correntes de partida, curto-circuitos, ou por intermitentes falhas nas conexões dos cabos do sistema. A Figura 2.3 ilustra variações de tensão com afundamento de tensão em (a), elevação de tensão em (b) e interrupção de tensão em (c).

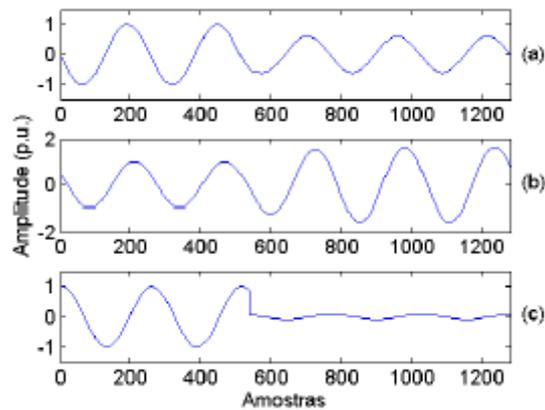


Figura 2.3 - Variações de tensão de curta duração: (a) afundamento de tensão; (b) elevação de tensão; (c) interrupção

2.1.1.3. Variações de tensão de longa duração

As variações de tensão de longa duração são caracterizadas pela alteração do valor RMS (do inglês Root Mean Square) da tensão na frequência fundamental do sistema por um período maior que 1 minuto. Estas variações podem ser positivas, caracterizando uma sobretensão, ou negativas, ocasionando uma subtensão. Todas elas são geralmente causadas por variações de carga e operações de chaveamento no sistema.

2.1.1.4. Deformação da forma de onda da tensão

As distorções das formas de onda de tensão são definidas como desvios da forma senoidal da tensão na frequência fundamental do sistema. Estas distorções se apresentam em regime permanente no sistema e são causadas em sua grande maioria pela presença de tensão de *offset*, harmônicos, inter harmônicos, *notches* e ruído no sistema elétrico. As principais características destes tipos de distúrbios são apresentadas na Tabela 2-1. A Figura 2.4 ilustra dois exemplos típicos de deformações da forma de onda da tensão.

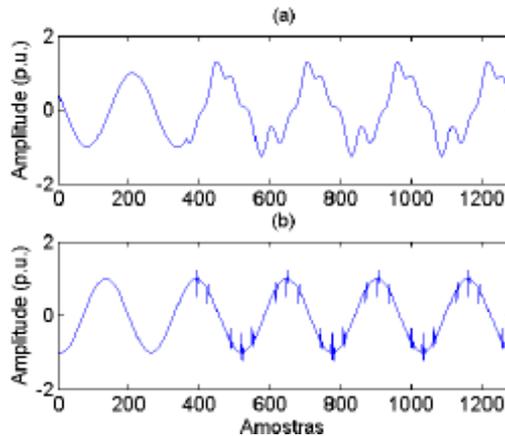


Figura 2.4 - Deformação da forma de onda de tensão: (a) harmônicos; (b) notches

2.1.1.5. Desbalanceamentos trifásicos

Existem quatro tipos de desbalanceamento trifásico, o tipo A que é devido a uma falta trifásica e os tipos B, C e D, que são devidos a faltas monofásicas e fase-fase. Basicamente, o tipo A é um afundamento nas 3 fases. O tipo B é um afundamento em apenas uma das fases. O tipo C é um afundamento em duas das fases e o tipo D é um afundamento em uma das fases e deslocamento de fase das outras duas.

2.1.2. Eventos de falta – curto-circuito

Falhas são curtos-circuitos e aberturas indesejadas que acontecem em sistemas de energia elétrica como resultado de variações físicas e/ou causas mecânicas. Os tipos mais frequentes de falha em sistemas de potência são as falhas de curto-circuito. As falhas de curto-circuito em sistemas trifásicos podem ser divididas em dois grupos: simétrico e assimétrico. As falhas que acontecem porque três fases se tocam (falta trifásica) ou tocam ao solo (trifásica à terra) são chamadas de faltas simétricas, uma vez que a diferença entre fases se mantém preservada em 120° . As faltas monofásicas a terra, bifásicas e bifásicas à terra são chamadas de faltas assimétricas.

2.1.3. Energização de transformador

Este tipo de evento causa um afundamento no sistema. A energização de um transformador pode criar um estado transitório até que o fluxo magnético em seu núcleo atinja um novo estado de equilíbrio. Assim, o fluxo magnético pode vir a exceder o valor de saturação. Este estado transitório permanece até que a alteração no fluxo magnético de um período, aproximadamente, decaia a zero. O aumento excessivo do fluxo magnético induzirá alta amplitude, assimetria e decaimento exponencial da corrente de magnetização. A

amplitude de um afundamento após a energização do transformador depende do ângulo de comutação, da fonte de tensão, do fluxo residual no núcleo e do valor de amortecimento de uma linha. Uma vez que os ângulos de um sistema trifásico de tensão são diferentes, a amplitude de afundamento criado por cada fase, também, será diferente.

2.1.4. Partida de cargas especiais

Partida de grandes motores de indução é a situação mais comum neste tipo de evento. Este evento é caracterizado por um afundamento trifásico seguido por um retorno lento ao regime permanente. Algumas características contribuem para a severidade e duração do evento, tais como potência, fator de potência e momento de inércia da carga.

A

Tabela 2-2 apresenta um resumo das principais causas associadas a alguns eventos de qualidade de energia.

2.2. MÉTODOS DE REPRESENTAÇÃO DE EVENTOS

O levantamento de dados do sistema de transmissão ou distribuição em estudo é uma etapa de grande valia no estudo e tem por objetivo obter informações, tais como diagramas unifilares, parâmetros de equipamentos, parametrização da proteção, etc., para que seja possível representar o sistema em softwares de simulação. O uso de simuladores se faz necessário visto que nem sempre existe um banco de dados amplo e confiável contendo registros de falhas previamente ocorridas e devidamente classificadas. Por outro lado, ainda que existam equipamentos para aquisição e armazenagem de dados relacionados a eventos, em muitas situações o número elevado de registros e de variáveis não permite a análise de todas as ocorrências por parte de especialistas visando diagnosticar corretamente o evento registrado. Neste contexto, o uso de simuladores para geração controlada de eventos permite a criação de uma base de dados fidedigna a ser processada pelos sistemas inteligentes de diagnóstico.

Diante do ilimitado número de cenários de falhas possíveis impossibilitando a cobertura de todas as possibilidades, a geração de cenários deve ser feita de forma cuidadosa visando fornecer ao sistema de diagnóstico um conjunto mínimo de informações para extração de conhecimento.

A geração por meio de simulação dos registros relacionados tanto com a operação normal quanto com eventos são necessários para o desenvolvimento e validação de um sistema de detecção de eventos que pode compor um sistema mais elaborado de diagnóstico de eventos.

Tabela 2-2 - Possíveis causas de alguns eventos de qualidade de energia (adaptado de [4])

Evento	Categoria	Característica	Possível causa
Transitório	Impulsivo	$t > 2 \mu s$	Descarga atmosférica.
Transitórios oscilatórios	Alta frequência	$f > 500 \text{ Hz}$	Eventos de chaveamento, transitório de comutação de circuitos RLC.
	Média frequência	$5 < f < 500 \text{ Hz}$	Transitório impulsivo, chaveamento de banco de capacitores próximo a outros bancos energizados.
	Baixa frequência	$0.3 < f < 5 \text{ Hz}$	Chaveamento de banco de capacitores
	Frequência muito baixa	$f < 300 \text{ Hz}$	Ferro-ressonância, energização de transformador
Variações de curta duração	Interrupção	$t < 1 \text{ min}$	Faltas no sistema de potência, falhas de equipamentos ou falha de controle.
	Afundamento (Sag)	$2 \text{ ms} < t < 1 \text{ min}$	Faltas no sistema de potência, entrada de grande bloco de carga no sistema, interação entre a carga e a linha de alimentação (principalmente durante a partida de equipamentos) ou entre a carga e a impedância da fonte de energia.
	Sobretensão (Swell)	$0.5 \text{ ciclos} < t < 1 \text{ min}$	Faltas no sistema de potência, saída de um grande bloco de carga ou chaveamento de um grande banco de capacitores.
Variações de longa duração	Sobretensão	$t > 1 \text{ min}$	Desligamento de cargas, variações na compensação de potência reativa no sistema, ajuste incorreto de reguladores de tensão.
	Subtensão	$t > 1 \text{ min}$	Desligamento de carga do sistema, variações na compensação de potência reativa no sistema, ajuste incorreto de reguladores de tensão, seleção incorreta de taps de transformadores, sobrecarga involuntária de linhas de transmissão.
	Interrupções sustentadas	$t > 1 \text{ min}$	Acidentes com linhas de transmissão, falhas em transformadores ou fontes alternativas de energia.
Distorções da forma de onda	DC <i>offset</i>	-	Distúrbios geomagnéticos, entrada ou saída de uma máquina síncrona no sistema, presença de fontes de potência chaveadas no sistema.
	Harmônicos	-	Dispositivos não lineares e cargas como, computadores, acionamentos de velocidade variável, sistemas eletrônicos de equipamentos de telefonia.
	Inter-harmônicos	-	Conversores estáticos de frequência, ciclo-conversores, motores de indução e dispositivos que operam com arco elétrico.
	Notches	-	Funcionamento normal de dispositivos chaveados de potência quando ocorre o chaveamento de uma fase para outra.
	Ruído	-	Dispositivos eletrônicos de potência, circuitos de controle, equipamentos que trabalham com arco elétrico e fontes chaveadas de potência
	Flutuação de tensão	-	Qualquer carga com considerável variação de corrente especialmente em componente reativa, como fornos e arco.
	Variações na frequência fundamental	-	Faltas na maior parte do sistema de transmissão, desconexão do sistema de grande bloco de carga, saída de grande grupo de geração.

Neste sentido, são necessários métodos e ferramentas computacionais para simulação de linhas de transmissão especialmente durante o período transitório, tendo por objetivo a obtenção de informações que caracterizem as diferenças entre a operação normal e a operação em falha. Ou, pela ótica da distribuição, se faz necessário um simulador de eventos de qualidade de energia, capaz de representar uma possível variação do estado normal do sistema.

Com o intuito de analisar o comportamento de linhas de transmissão frente a operações de manobras programadas ou intempestivas, a simulação digital no domínio do tempo em programas computacionais para transitórios eletromagnéticos é amplamente

utilizada. Pode ser dito que os programas mais consagrados são os derivados do antigo EMTP - *The Electromagnetic Transients Program*[5] e o programa PSCAD - *Power Systems Computer Aided Design* desenvolvido a partir do EMTDC-*Electromagnetic Transients including DC*[6]. Estes programas utilizam a metodologia de modelagem de sistemas de potência proposta em [5], baseada na primeira versão do programa computacional EMTP. Posteriormente, com a difusão dos microcomputadores e com a política de gratuidade de licença, foi desenvolvido o ATPDraw, que é uma interface gráfica que permite a criação de circuitos elétricos a partir do mouse por meio de componentes em menus, facilitando a criação dos arquivos de entrada a serem utilizados no ATP - *Alternative Transient Program*. Por ser mais simples, o ATPDraw é amplamente utilizado nas empresas e universidades. O ambiente de simulação SIMULINK do software MATLAB [8] também é bastante utilizado no meio acadêmico, devido principalmente à possibilidade de aplicação direta das diversas bibliotecas disponibilizadas no MATLAB. Dos programas comerciais, o PSCAD [6] é um dos mais usados.

Atualmente a metodologia de modelagem desenvolvida em [5] é amplamente difundida no meio acadêmico, sendo apresentada em diversos livros-texto sobre transitórios eletromagnéticos [9]-[12]. As grandes vantagens da metodologia são a simplicidade, eficiência computacional, precisão e robustez numérica. A eficiência está relacionada com a utilização de técnicas de esparsidade e ordenação matricial [13] similares às empregadas em programas atuais de fluxo de potência.

No início do desenvolvimento do EMTP [5], as linhas de transmissão eram representadas por modelos de parâmetros concentrados utilizando cascata de circuitos RLC com acoplamento indutivo e capacitivo entre as fases, ou por meio de modelo de ondas trafegantes em linhas sem perdas utilizando o método das características [14], sendo que as perdas eram representadas por resistências concentradas nos terminais e no meio da linha. O desequilíbrio das matrizes de parâmetros era resolvido utilizando uma transformação modal para diagonalização das matrizes [15]-[17]. Estes modelos desconsideravam a dependência dos parâmetros elétricos da linha com a frequência, principalmente ocasionada pelo efeito pelicular da corrente nos cabos e da resistividade não nula do solo.

Na época, a modelagem da dependência dos parâmetros com a frequência era bem conhecida para o domínio da frequência [18], no entanto, era de difícil incorporação na metodologia proposta em [5]. A modelagem do efeito pelicular dos condutores no domínio da frequência já havia sido desenvolvida em 1918 [19] e a modelagem do solo em 1926 [20]. Posteriormente foram propostas simplificações para solução analítica aproximada [21],[22].

No entanto ainda não havia solução numérica robusta para incorporação destes efeitos no domínio do tempo. Diversos modelos foram propostos nesta época, no entanto, apenas em 1982 foi proposto um modelo razoavelmente preciso e confiável para linhas de transmissão com dependência dos parâmetros com a frequência [23] que utiliza convolução recursiva [21]. Este modelo é um dos mais utilizados hoje em dia e está implementado tanto no ATP quanto no PSCAD. Uma das imprecisões deste modelo é que a sua matriz de transformação modal não pode ser considerada variável com a frequência, sendo impreciso para linhas de transmissão muito desbalanceadas. Para contornar este problema foram propostos diversos outros modelos no domínio de fases ao invés do domínio modal.

Atualmente o PSCAD possui o modelo desenvolvido em [24], que utiliza a técnica de ajuste vetorial detalhada em [25]. No ATP foi implementado o modelo desenvolvido em [26] e melhorado posteriormente em [27]. Em particular este modelo do ATP baseado em modelos autoregressivos com média móvel (do inglês *Autoregressive Moving Average – ARMA*) exige uma maior interação do usuário na escolha dos parâmetros para ajuste.

Mesmo existindo modelos de alta qualidade nos programas atuais de simulação de transitórios eletromagnéticos, pode ser dito que a modelagem no domínio do tempo de linhas de transmissão com parâmetros dependentes com a frequência não é um assunto esgotado e ainda desperta o interesse de diversos pesquisadores. Mesmo recentemente, ainda são propostos novos modelos com o objetivo de melhoria de precisão ou eficiência computacional, como, por exemplo, em [28].

Ainda que o avanço da capacidade de processamento permita a modelagem cada vez mais precisa dos fenômenos eletromagnéticos em linhas de transmissão, o levantamento fidedigno dos dados de cada equipamento e a correta parametrização dos modelos ainda é a principal etapa do processo de simulação. Por exemplo, Portela e colaboradores [29] apresentaram os efeitos da condutividade do solo nas simulações de transitórios eletromagnéticos em linhas de transmissão, destacando a importância da correta modelagem do solo principalmente na representação de transitórios rápidos (acima de 10 kHz) como aqueles verificados em descargas atmosféricas, curto-circuito e atuação rápida da proteção.

Outra linha de pesquisa importante que aborda a simulação de fenômenos eletromagnéticos em linhas de transmissão diz respeito à modelagem de eventos. Ainda que a maioria dos sistemas de diagnóstico represente a ocorrência de falhas por meio da abertura e fechamento de circuitos auxiliares, alguns fenômenos físicos podem apresentar peculiaridades que devem ser representadas em maior nível de detalhe no ambiente de simulação. Por exemplo, em [30] os autores comparam a utilização do modelo universal disponibilizado pelo

ATP/EMTP para falhas com arco elétrico para representação de falhas causadas por árvores com um modelo mais detalhado onde o perfil térmico da árvore é descrito de forma dinâmica. Na mesma linha, Funabashi e colaboradores [31] apresentam a influência das não linearidades existentes nos arcos elétricos formados durante falhas no desempenho dos sistemas de localização de defeitos, evidenciando a importância da modelagem fidedigna dos fenômenos envolvidos. Esta é uma linha de pesquisa promissora que requer estudos mais aprofundados envolvendo também a coleta de dados em campo e diversos experimentos laboratoriais para desenvolvimento dos modelos de representação do fenômeno físico.

Neste trabalho será utilizado o programa ATP para gerar a base de dados para representação dos eventos de falta em linha de transmissão. Os dados originais foram extraídos da rede de transmissão da CPTE - Cachoeira Paulista Transmissora de Energia, resultado do projeto de pesquisa e desenvolvimento “Sistema Inteligente para Diagnóstico de Falhas em Linhas de Transmissão”, integrante da carteira de projetos de P&D da ISOLUX Infrastructure LTDA, e desenvolvido em conjunto por pesquisadores da Universidade Federal Fluminense (UFF) e da Jordão Engenharia.

Para representação dos eventos de qualidade de energia, por não se ter disponibilidade de dados de um alimentador real de uma distribuidora como nos eventos de falha em linha de transmissão, serão geradas simulações sintéticas no programa Matlab a partir de equações extraídas da formulação completa de distúrbio. O estudo aprofundado do tema pode ser encontrado em [33] e [37]. Importante destacar que, da mesma forma como para representação das faltas em linhas de transmissão, o ATP poderia ter sido implementado para gerar os cenários dos eventos de qualidade de energia. Porém, por questões de simplicidade, os casos foram gerados tomando-se por base as formulações dos eventos conforme descrito em [37] e as simulações foram realizadas no programa Matlab.

2.3. ESTADO DA ARTE SOBRE MÉTODOS DE DETECÇÃO DE EVENTOS

O diagnóstico de falhas em sistemas de potência inclui a tarefa de identificar a localização e a causa dos defeitos que ocorrem nestes sistemas. É uma atividade que envolve equipes de manutenção e operação de equipamentos de uma rede elétrica de potência e deve ser considerada e planejada ainda na etapa de projeto de automação para novas instalações.

A proliferação de sistemas de monitoramento ao longo dos sistemas de potência em conjunto com o aumento exponencial da capacidade de processamento dos computadores tem permitido o surgimento de metodologias e sistemas computacionais para automação da

atividade de diagnóstico, tendo por objetivo auxiliar a tomada de decisão tanto na operação em tempo real quanto em ambiente de planejamento. Neste contexto, os sistemas de suporte relacionados ao processamento de informações oriundas de eventos podem ser divididos em duas vertentes: processamento de alarmes e análise de eventos. Em linhas gerais, os sistemas para processamento de alarmes realizam a filtragem de todos os alarmes disponíveis para o operador visando fornecer para este uma visão global do estado operativo atual do sistema, incluindo possíveis estados de falha. Na ocorrência de eventos, estes sistemas auxiliam na filtragem da chamada “avalanche de alarmes” subsidiando a tomada de decisão por parte do operador.

Já os sistemas de análise de eventos realizam o processamento somente de informações diretamente relacionadas com defeitos (medidas e/ou alarmes), dedicando sua atuação somente para auxílio à tomada de decisão durante a ocorrência de eventos ou para avaliação *ex-post* de ocorrências.

Na literatura associada a sistemas para análise de eventos, a tarefa de diagnóstico de eventos pode ser dividida em três módulos: detecção, classificação e localização.

Este trabalho tem enfoque na avaliação de técnicas utilizadas para detecção de eventos, neste sentido, serão consideradas somente metodologias com atuação nessa linha.

A correta análise das formas de onda de tensão e corrente é o passo mais importante para caracterização de uma ocorrência em um registro oscilográfico. Um sistema de diagnóstico de evento num sistema de potência se torna uma ferramenta de apoio à tomada de decisões. O primeiro módulo desse sistema é a detecção do evento.

O processo de detecção como um todo envolve duas fases distintas: a identificação dos instantes de tempo em que ocorrem a transição - geralmente chamado de fase de disparo, e a segmentação da forma de onda em blocos de tempo desmembrados. A fase de segmentação divide o sinal em estado transitório e quase-estacionário, o que permite a análise da forma de onda de modo independente.

De acordo com [32], existem diversos métodos para disparo e segmentação de oscilografias. Geralmente, estes métodos são agrupados de acordo com a característica de pré-processamento aplicado ao sinal em análise. Os principais grupos são: análise do sinal no

domínio do tempo, métodos de filtragem, análise no domínio de tempo-frequência, estimação espectral e métodos de aprendizado de máquina.

A fase de detecção é necessária para identificação do instante de tempo de ocorrência do evento causador da falha. Neste sentido, para aplicações on-line a etapa de detecção do evento é realizada pelo sistema de proteção. Em sistemas de diagnóstico off-line desenvolvidos para análise ex-post de ocorrências, a etapa de detecção do instante de ocorrência do evento é importante para filtragem das informações necessárias para as análises subsequentes, incluindo a eventual sincronização de dados caso os registros não possuam uma mesma referência temporal [39]. As metodologias propostas para detecção fazem uso das oscilografias fornecidas pelos registradores de eventos. A análise destes sinais pode ser feita a partir da comparação entre amostras consecutivas no tempo ou entre conjuntos de amostras coletadas antes (pré-falta) e depois (pós-falta) do instante de tempo em avaliação [40]. Estes sistemas podem ser utilizados inclusive para análise da atuação dos sistemas de proteção frente à ocorrência de eventos. A maioria dos sistemas de diagnóstico existentes na literatura e em uso no setor elétrico mundial é desenvolvida para aplicações off-line de análise de ocorrências, com a proteção efetiva do sistema de transmissão ficando a cargo de equipamentos tradicionais (relés e disjuntores).

As técnicas de detecção de eventos baseadas em sistemas de dados, também conhecido como *data-driven*, constituem a linha de pesquisa em Inteligência Computacional que tem por objetivo o desenvolvimento de sistemas inteligentes com capacidade para extrair conhecimento a partir dos dados (registros) disponíveis sobre o problema. No que tange a aplicações para detecção de eventos, estes sistemas podem ser divididos em três subgrupos:

1. Técnicas de processamento de sinal: análise das oscilografias armazenadas pelos registradores de eventos utilizando técnicas de processamento de sinal;
2. Métodos estatísticos: desenvolvimento de modelos estatísticos tradicionais para extração de conhecimento sobre as possíveis falhas;
3. Técnicas de aprendizado de máquina: desenvolvimento de modelos de classificação e regressão estimados a partir dos dados para detecção de eventos.

2.3.1. Técnicas de processamento de sinal

Os métodos de processamento de sinal consistem em um conjunto de ferramentas matemáticas desenvolvidas para estimação, análise e detecção de sinais das mais diferentes naturezas. Estes métodos utilizam conceitos estatísticos relacionados com processos estocásticos e outras teorias, sendo utilizados para diagnóstico de falhas em linhas de transmissão com diversos objetivos, quais sejam: análise das oscilografias, extração de características, compressão de informações.

O uso de técnicas de processamento de sinal para detecção de eventos é bastante difundido na literatura. Em suma maioria, estes trabalhos utilizam uma determinada técnica (Transformada Rápida de Fourier, do inglês Fast Fourier Transform – FFT, Transformada Wavelets, Transformada Prony, dentre outras) para processamento da oscilografia em análise. O resultado do processamento é apresentando a um conjunto de regras definidas de forma heurística para análise das componentes e/ou coeficientes das transformadas visando fornecer o diagnóstico para a oscilografia em análise. Além da definição heurística do conjunto de regras, os limiares de decisão estabelecidos também são definidos de forma arbitrária, comprometendo a extensão da técnica para outros sistemas.

Como exemplos de propostas que seguem esta linha, os trabalhos apresentados em [41], [42], [43] e [44] usam Wavelets para detecção de eventos.

As referências [45], [46], [47] e [48] utilizam transformada Wavelets e fazem uso desta estratégia heurística para detecção e classificação de eventos. Em [49] é aplicada transformada Wavelet ao sinal de corrente, com a análise dos coeficientes obtidos sendo feita através de um algoritmo heurístico para detecção do instante de ocorrência do evento. A teoria da informação, outra técnica bastante utilizada para processamento de sinais, é aplicada em conjunto com a transformada Wavelets para detecção e classificação de falhas em linhas de transmissão em [50] e [51].

Em adição, a proposta apresentada em [52] traz um modelo combinando Wavelets para processamento dos sinais de corrente nas três fases, gerando coeficientes utilizados em um módulo de detecção da falha em um algoritmo heurístico.

2.3.2. Métodos estatísticos

Os métodos estatísticos constituem uma classe de técnicas que utilizam conceitos tradicionais da estatística para detecção de eventos. Como todo método baseado em dados, estas técnicas visam retirar informação a partir dos dados coletados em campo ou gerados através de simulação.

Gilbert e Morrison [53] utilizam estatísticas simples (no caso a mediana calculada através de janela deslizante ao longo da oscilografia de tensão ou corrente) para detecção de faltas. Na referência [54] os autores computam estatísticas relacionadas com a transformada Wavelet das oscilografias de corrente para detecção de falhas e sinalização do alimentador onde ocorreu a falha em um sistema de média tensão com múltiplos terminais em um mesmo barramento.

O filtro de Kalman é outra técnica estatística bastante utilizada em sistemas de potência, incluindo algumas aplicações na área de estudo. Chowdhury e colaboradores [55] utilizam filtro de Kalman em conjunto com testes de hipótese para detecção de eventos em linhas de transmissão. Em [56] o filtro de Kalman é utilizado para estimação das grandezas elétricas (tensão e corrente) e um conjunto de estatísticas para estimação da probabilidade de ocorrência de falha em um dado instante de tempo da oscilografia.

2.3.3. Técnicas de aprendizado de máquina

A área de Aprendizado de Máquina, do inglês Machine Learning, tem por objetivo o estudo de técnicas para desenvolvimento de sistemas com a capacidade de extrair conhecimento a partir de dados. Sob este prisma amplo, os métodos de processamento de sinal e da estatística tradicional também podem ser entendidos como um subconjunto desta nova área do conhecimento, sendo incluídas nesta linha por alguns autores em [57] e [58]. Além destas técnicas estatísticas e matemáticas tradicionais, a área de Aprendizado de Máquina envolve também questões relacionadas à filosofia, psicologia e neurociência, afeitas ao entendimento dos processos de aprendizagem desenvolvidos pelo cérebro. Neste sentido, também são estudados modelos matemáticos para representação dos processos de aprendizagem sob diversos pontos de vista (supervisionado, não-supervisionado, competitivo, estatístico, dentre outros). Seguindo esta linha surgem diversos modelos, incluindo as redes neurais artificiais e os modelos baseados na teoria de aprendizado estatístico.

As redes neurais artificiais (RNAs) podem ser vistas como um processador de sinais paralelamente distribuído, constituído de unidades de processamento simples, conhecidas como neurônios, que adquirem conhecimento acerca de uma determinada tarefa através da integração com o ambiente via um algoritmo de aprendizagem. Tal conhecimento é armazenado nos pesos sinápticos que interligam os diversos neurônios.

Mantendo a analogia biológica, os neurônios constituintes das RNAs são dispostos em camadas, e a forma com que estas camadas são interligadas define a arquitetura do modelo. Basicamente, existem duas estruturas, as redes alimentadas adiante (do inglês *feedforward*) e as redes recorrentes. Nas redes *feedforward* as camadas são conectadas de forma consecutiva e adjacente, com o sinal fluindo da entrada para a saída em sentido único. As redes recorrentes apresentam um ou mais laços de realimentação nesta estrutura.

Dentre as principais vantagens dos modelos neurais, podem ser citadas as seguintes:

1. Não-linearidade: para o caso mais comumente utilizado, em que a função de ativação dos neurônios da camada oculta é não-linear, o modelo neural resultante da interconexão destas unidades mais simples apresenta considerável grau de não-linearidade. Entretanto, esta vantajosa característica pode ser prejudicial na presença de dados ruidosos.
2. Mapeamento entrada-saída: a partir de um conjunto de pares entrada-saída, as redes neurais realizam um mapeamento destes dados, sem a necessidade de desenvolvimento de modelos matemáticos abordando a dinâmica do processo.
3. Adaptabilidade: estes modelos apresentam elevada capacidade de adaptação em virtude de mudanças nas condições do ambiente para o qual a rede foi treinada para operar. Para tal, basta treinar a rede novamente, incluindo no conjunto de treinamento, os padrões referentes às novas condições operacionais.
4. Implementação simples: como os modelos *feedforward* podem ser vistos como grafos orientados, a implementação destas estruturas é extremamente simples quando comparada com o grau de complexidade dos modelos que podem ser gerados.

Além destas vantagens, o teorema da aproximação universal [58] afirma que modelos *feedforward* podem aproximar com precisão arbitrária qualquer função contínua. Para tal, a estrutura deve apresentar ao menos uma camada oculta contendo neurônios com função de ativação contínua, não-constante, limitada, e uma saída linear, representando a aproximação

da função desejada e desconhecida. Portanto, modelos *feedforward* com uma única camada escondida contendo um número suficiente de neurônios com função de ativação com as características anteriormente citadas podem aproximar qualquer função contínua.

A literatura é vasta em termos de aplicações utilizando redes neurais artificiais, com amplo destaque para metodologias baseadas no paradigma do aprendizado supervisionado. Esta visão do processo de aprendizagem parte da premissa da existência de rótulos para os padrões disponíveis, ou seja, existe um conjunto de padrões de entrada (variáveis que caracterizam o problema) cada um deles associados a uma saída desejada (valor conhecido para aquele dado conjunto de variáveis). Exemplificando para o problema de diagnóstico de falhas em linhas de transmissão, os padrões de entrada são constituídos de variáveis que caracterizam o evento (informações das oscilografias de tensão e corrente, posição de chaves e disjuntores, alarmes associados com atuação da proteção), com a saída desejada podendo representar diversas informações dependendo do módulo em questão. Neste caso, a detecção do evento, cujo objetivo consiste em detectar o instante de tempo onde o sistema transitou do estado normal para o estado em falha e, portanto, a saída desejada é binária, discernindo os padrões relacionados com operação normal daqueles com operação com falha.

A literatura apresenta diversos tipos de redes neurais artificiais para abordagem da detecção de eventos, podendo ser citados: perceptron de múltiplas camadas (do inglês *Multi-layer Perceptron* – MLP), redes de função de base radial (do inglês – RBFs) e máquinas de vetor suporte (do inglês, *Support Vector Machines* – SVMs). Os MLPs e as RBFs foram desenvolvidos por pesquisadores da área de Inteligência Artificial, tendo por objetivo inicial a obtenção de modelos matemáticos para representação do processo de aprendizagem supervisionada. Tinham como base a minimização do risco empírico, ou seja, a obtenção de modelos com capacidade de aproximar os dados existentes e a partir desta aproximação generalizar o conhecimento obtido para novos dados. Tendo por base a minimização da soma dos erros quadráticos, esta abordagem requer uma quantidade significativa de dados, além de possibilitar a estimação de modelos com excelente desempenho para os dados conhecidos, porém baixa capacidade de extrapolação para novos dados, em um problema conhecido como *overfitting* ou ajuste excessivo dos dados. Discussões sobre esta limitação e formas para superar este desafio podem ser encontradas em [59], [60] e [61].

As SVMs foram desenvolvidas com base em um novo paradigma da área de aprendizado de máquina, conhecido como aprendizado estatístico. Diferentemente da

abordagem clássica de problemas de classificação, que necessitam de uma quantidade elevada de dados em conjunto com a inserção de conhecimento prévio sobre o problema, a teoria do aprendizado estatístico foi desenvolvida para solução de problemas cuja quantidade de dados disponíveis é reduzida e pouco, ou até mesmo nenhum, conhecimento prévio pode ser utilizado, características comumente encontradas em aplicações reais [62]. A teoria das SVMs foi originalmente elaborada para solução de problemas de classificação através da aplicação do conceito de hiperplano ótimo, baseado na maximização da margem de separação ρ . Em outras palavras, o objetivo do aprendizado reside na estimação da fronteira de separação entre as classes que provê o maior distanciamento entre as mesmas. Esta teoria pode ser estendida a problemas de regressão, além de incluir os MLPs e as RBFs como casos particulares das SVMs. A teoria relacionada a estes modelos pode ser encontrada em [57], [58] e [62].

Existem propostas de metodologias para detecção de eventos, como, por exemplo, em [63], onde são utilizados MLPs tendo como entradas as correntes nas três fases a cada ciclo (33 amostras por ciclo), sendo aplicado o conceito de janela deslizante. Nesta formulação, o sistema analisa a oscilografia à cada amostra (ou conjunto de amostras) recebida, sendo consideradas na análise somente as amostras incluídas na janela (no caso, as últimas 33 amostras).

Técnicas de processamento de sinal para extração das características a serem apresentadas aos módulos de detecção são aplicadas em [64], onde a transformada Wavelet é utilizada para processamento dos sinais de corrente e tensão visando estabelecer os padrões de entrada de modelos para detecção e classificação de falhas em linhas de transmissão. O módulo de detecção é baseado em um conjunto de regras envolvendo as correntes pré e pós falta e a energia da primeira decomposição da transformada Wavelet. A base de conhecimento utilizada pelo sistema de detecção é definida de forma heurística, não sendo garantida sua aplicação para outras configurações e topologias. Tendo em mente a definição de uma metodologia automática que seja independente da aplicação específica para a qual é desenvolvida, a proposta apresentada em [64] carece de maiores desenvolvimentos em busca de tal nível de automação.

Outras técnicas para extração de características também podem ser utilizadas em alternativa às transformadas Wavelet e FFT. Em [65] os autores utilizam uma técnica baseada em determinantes para condensação das informações das oscilografias dos registradores de eventos visando a geração dos padrões de entrada de SVMs para detecção de eventos.

Portanto, como pode ser visto, existem diversas técnicas promissoras que podem ser implementadas no intuito de detectar um distúrbio no sistema de potência. Neste trabalho, serão abordadas algumas das técnicas citadas acima. O próximo capítulo abordará detalhadamente as técnicas utilizadas neste trabalho.

3. TÉCNICAS INTELIGENTES PARA ANÁLISE DE EVENTOS

Neste capítulo serão apresentadas as técnicas inteligentes para análise de eventos em sistemas de transmissão e distribuição de energia que foram contempladas neste trabalho.

A princípio, serão apresentadas as técnicas utilizadas para detecção de instantes transitórios com base nos modelos estatísticos, Operador de energia de Teager e Filtro de Kalman. Em seguida, será discutido o método baseado em inteligência artificial, Rede Neural Autônoma.

3.1. OPERADOR DE ENERGIA DE TEAGER

O operador de energia de Teager – OET, é um operador não-linear, cuja finalidade inicial era extrair a energia do processo mecânico associado a um sinal composto por uma única frequência. A utilização desse operador para detecção de anormalidades em sinais temporais fundamenta-se no trabalho proposto por Kaiser em 1993 e abordado em [32], uma vez que quando aplicado a sinais não-estacionários é possível se obter o realce dos instantes de variações abruptas do sinal.

A equação (3-1) mostra o cálculo desse operador para um sinal de entrada $x(n)$. Fica clara a simplicidade desse método, uma vez que esse operador necessita apenas das informações de amostra atual, anterior e posterior para sua estimação [32]:

$$\psi[x(n)] = [x(n)]^2 - x(n+1)x(n-1) \quad (3-1)$$

A partir do cálculo de $\psi[x(n)]$ para cada amostra do sinal, pode-se empregar a metodologia de comparação com o limiar e suavização. Para realizar o cálculo automático do limiar de OET, seguiu-se uma abordagem empírica apresentada em [32] com base nas oscilografias normais que são aquelas sem a presença de estados transitórios. O processo de

determinação do limiar começa com a seleção de um número fixo de oscilografias normais. Neste trabalho, considerou-se que um registrador de eventos entrega uma oscilografia com pelo menos três ciclos completos normais. Basta uma oscilografia normal do sinal para que o detector seja treinado.

A partir da aquisição da oscilografia normal, é realizado o cálculo da energia pelo OET. O maior valor de energia calculado é definido como o limiar de detecção. Isso indica que o limiar escolhido está no limite superior do ruído existente nas oscilografias normais. Como a premissa utilizada para treinamento do detector foi o recebimento de uma oscilografia com pelo menos três ciclos normais, sem transitórios, a definição do limiar indica que um sinal recebido com energia superior ao de uma oscilografia normal, será identificado como evento.

Com essa escolha, assume-se um limiar constante para cada nova oscilografia, visto que o cálculo do limiar depende da entrada de oscilografias normais pré-falta.

Um exemplo dessa metodologia está apresentado na Figura 3.1.

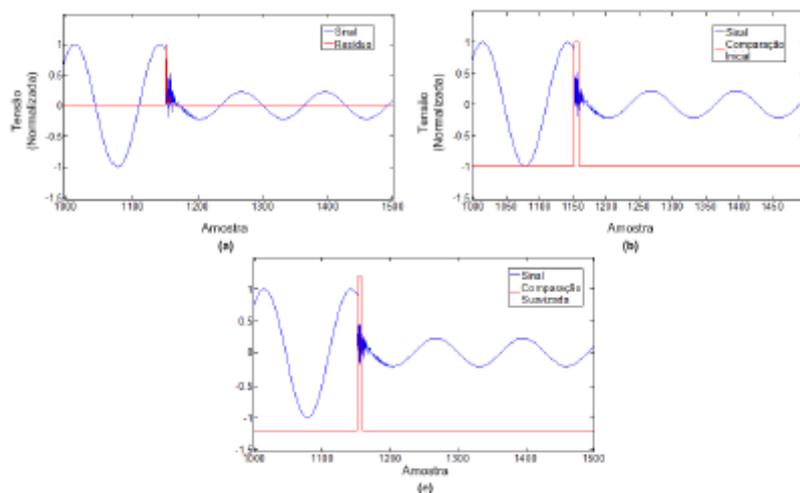


Figura 3.1 - Exemplo de segmentação para modelos utilizando operador de energia de Teager. Cálculo de $\psi[x(n)]$ (a) seguindo da limiarização através da determinação empírica do limiar; (b) suavização; (c) da limiarização apresentada em (b) [32]

3.2. FILTRO DE KALMAN

O filtro de Kalman – FK, é um tipo especial de filtro cuja principal característica é a estimação recursiva ótima dos estados e parâmetros de um modelo. O filtro de Kalman realiza essa estimação através de um processo de predição-correção no qual são representadas as relações entre as medidas e os estados, bem como as relações entre os estados atuais e

anteriores. Para tanto, faz-se necessária a representação do modelo em equações de estado conforme demonstra a sua formulação básica, dada pelas equações de estado – (3-2) e observação – (3-3) [32]:

$$\underline{x}(n) = \underline{A}(n-1)\underline{x}(n-1) + \underline{w}(n) \quad (3-2)$$

$$\underline{z}(n) = \underline{C}(n)\underline{x}(n) + \underline{v}(n) \quad (3-3)$$

sendo $\underline{x}(n)$ o vetor de variáveis de estado, $\underline{A}(n)$ a matriz responsável pela transição entre dois estados subsequentes, $\underline{C}(n)$ a matriz de observação que relaciona os estados $\underline{x}(n)$ com as medidas (observações) $\underline{z}(n)$, $\underline{w}(n)$ é o ruído do modelo com média nula e matriz de covariância dada por $E[\underline{w}(n)\underline{w}^T(n)] = \underline{Q}_w$ e $\underline{v}(n)$ o ruído de medição com média nula e matriz de covariância dada por $E[\underline{v}(n)\underline{v}^T(n)] = \underline{Q}_v$. Ambos os ruídos são considerados ruído branco.[32]

Antes de se aplicar o filtro de Kalman, é necessário definir as variáveis de estado $\underline{x}(n)$ de acordo com o problema a ser modelado. Uma vez definidas essas variáveis, as equações de estado – (3-2) e observação – (3-3) podem ser determinadas assumindo as matrizes $\underline{A}(n)$ e $\underline{C}(n)$ com valores constantes. Para o problema de detecção de eventos com base em estimação espectral, pode-se assumir a seguinte formulação para o vetor de entradas (medidas) $\underline{z}(n)$: [32]

$$z(n) = \sum_{k=1}^K s_k(n) + v(n) \quad (3-4)$$

sendo o conteúdo harmônico representado por $s_k = \underline{A}_k e^{jnwk}$, $k=1, \dots, K$, para um total de K harmônicos a serem estimados. Sendo assim, pode-se definir o vetor de estados $\underline{x}(n)$ como:

$$\underline{x}(n) = [s_{1,r}(n) s_{1,i}(n) \dots s_{K,r}(n) s_{K,i}(n)]^T \quad (3-5)$$

sendo $s_{1,r}(n)$ e $s_{1,i}(n)$ as partes real e imaginária de $s_r(n)$ no instante n , respectivamente, representados pela equações (3-6) e (3-7):

$$s_{1,r}(n) = \text{Re}[s_k(n)] = a_k \cos(nw_k + \varphi_k) \quad (3-6)$$

$$s_{k,i}(n) = \text{Im}[s_k(n)] = a_k \text{sen}(nw_k + \varphi_k) \quad (3-7)$$

Nesta equação, a_k e φ_k representam a magnitude e fase do k -ésimo harmônico, respectivamente. Considerando as variáveis $s_{k,r}(n+1)$ e $s_{k,i}(n+1)$ no instante $n+1$, é possível estabelecer as seguintes relações:

$$s_{k,r}(n+1) = a_k \cos[(n+1)w_k + \varphi_k] = s_{k,r} \cos(w_k) - s_{k,i} \text{sen}(w_k) \quad (3-8)$$

$$s_{k,i}(n+1) = a_k \text{sen}[(n+1)w_k + \varphi_k] = s_{k,r} \text{sen}(w_k) - s_{k,i} \cos(w_k) \quad (3-9)$$

Combinando as equações (3-5), (3-8) e (3-9), obtém-se a matriz de transição entre estados $\underline{\underline{A}}(n)$, como mostra a equação (3-10):

$$\begin{bmatrix} \cos(w_1) & -\text{sen}(w_1) & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \text{sen}(w_1) & \cos(w_1) & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \cos(w_K) & -\text{sen}(w_K) \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & \text{sen}(w_K) & \cos(w_K) \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

sendo w_k um parâmetro fornecido *a priori*, relacionado ao conteúdo harmônico do sistema, uma vez que $w_k = kw_0$ e $k = 1, 2, \dots, K, w_0 = 2\pi f_0 / f_s$, com f_s respondendo pela frequência de amostragem escolhida e f_0 a frequência fundamental [32].

Através da representação de $\underline{z}(n)$ como um somatório ponderado de senos e cossenos e um ruído branco $v(n)$, $\underline{\underline{C}}(n)$ torna-se um vetor de comprimento $2K$:

$$\underline{\underline{C}}(n) = [10 \dots 10] \quad (3-11)$$

Além disso, os vetores $\underline{v}(n) = [v(n) \ 0 \ \dots \ 0 \ 0]^T$ e $\underline{w}(n) = [w(n) \ 0 \ \dots \ 0]^T$ são ambos de comprimento $2K$.

Depois de definida a modelagem do problema, o cálculo do filtro de Kalman é feito de maneira recursiva, utilizando uma estimativa inicial do vetor de estados e da matriz de covariância $\hat{\underline{\underline{P}}}(n-1)$. Com esses valores calcula-se o ganho do filtro $\underline{\underline{K}}(n)$ para o instante n :

$$\underline{\underline{K}}(n) = \hat{\underline{\underline{P}}}(n-1) [\underline{\underline{C}}(n)]^{*T} [[\underline{\underline{C}}(n)]^{*T} \hat{\underline{\underline{P}}}(n-1) [\underline{\underline{C}}(n)]^{*T} + \underline{\underline{Q}}_v]^{-1} \quad (3-12)$$

sendo $\underline{\underline{Q}}_v$ a covariância associada ao ruído de medição e a operação $*$ o conjugado complexo.

Com o ganho, pode-se atualizar a matriz de covariância e o vetor de estados, utilizando também a própria medida $\underline{z}(n)$ para correção:

$$\hat{\underline{\underline{P}}}(n) = \hat{\underline{\underline{P}}}(n-1) (I - \underline{\underline{K}}(n) \underline{\underline{C}}(n)) \quad (3-13)$$

$$\hat{\underline{x}}(n) = \hat{\underline{x}}(n-1) + \underline{K}(n)[\underline{z}(n) - \underline{C}(n)\hat{\underline{x}}(n-1)] \quad (3-14)$$

sendo o termo $[\underline{z}(n) - \underline{C}(n)\hat{\underline{x}}(n-1)]$ o próprio resíduo de predição. O último estágio do processo é a atualização do vetor de estados e de sua matriz de covariância:

$$\underline{x}(n+1) = \underline{A}(n)\underline{x}(n) \quad (3-15)$$

$$\hat{\underline{P}}(n+1) = \underline{A}(n)\hat{\underline{P}}(n)[\underline{A}(n)]^{*T} + \underline{Q} \quad (3-16)$$

Esse processo é repetido para todas as amostras do sinal de entrada. A partir dos resíduos estimados a cada amostra, pode-se empregar a metodologia de comparação com o limiar automaticamente calculado através do conceito do limiar universal apresentado a seguir.

A ideia principal do cálculo automático do limiar baseia-se na proposta de [39] e [41]. Basicamente é a aplicação do conceito de um limiar universal, cujo cálculo é fundamentado no erro médio absoluto do sinal. Sua proposição inicial era voltada para redução de ruído de um sinal no domínio Wavelet. Porém, sua aplicação pode ser bastante útil para determinação automática de limiares em resíduos de modelos de estimação espectral. Sua fundamentação teórica considera que é possível utilizar esse limiar no cenário em que o ruído a ser descartado possui uma distribuição normal com média nula e variância $\sigma_r (N(0, \sigma_r))$. Sendo assim, a determinação deste limiar é dada por:

$$limiar = \frac{\sigma}{0,6725} \sqrt{2 \ln(N)} \quad (3-17)$$

sendo N o comprimento do sinal e σ a mediana do erro absoluto do sinal estimado em relação à observação.

Existem instantes de tempo cujo valor do resíduo calculado é inferior ao valor limiar, muito embora esses instantes pertençam ao transitório de mudança de estado. Esse fenômeno faz com que seja necessário mais um estágio para a segmentação do sinal sob análise, de forma a suavizar a resposta do método de detecção. Basicamente, deve-se considerar que os picos muito próximos devem ser agrupados, de forma que os instantes de tempo que possuem o resíduo inferior ao limiar, mas estão próximos de instantes de tempo cujo resíduo é superior ao limiar, devem ser agrupados e considerados como parte do transitório do sinal. Com isso, obtém-se todo o processo de segmentação [32].

Um exemplo dessa metodologia utilizando resíduos calculados a partir de uma estimação realizada com Filtro de Kalman é ilustrada na Figura 3.2.

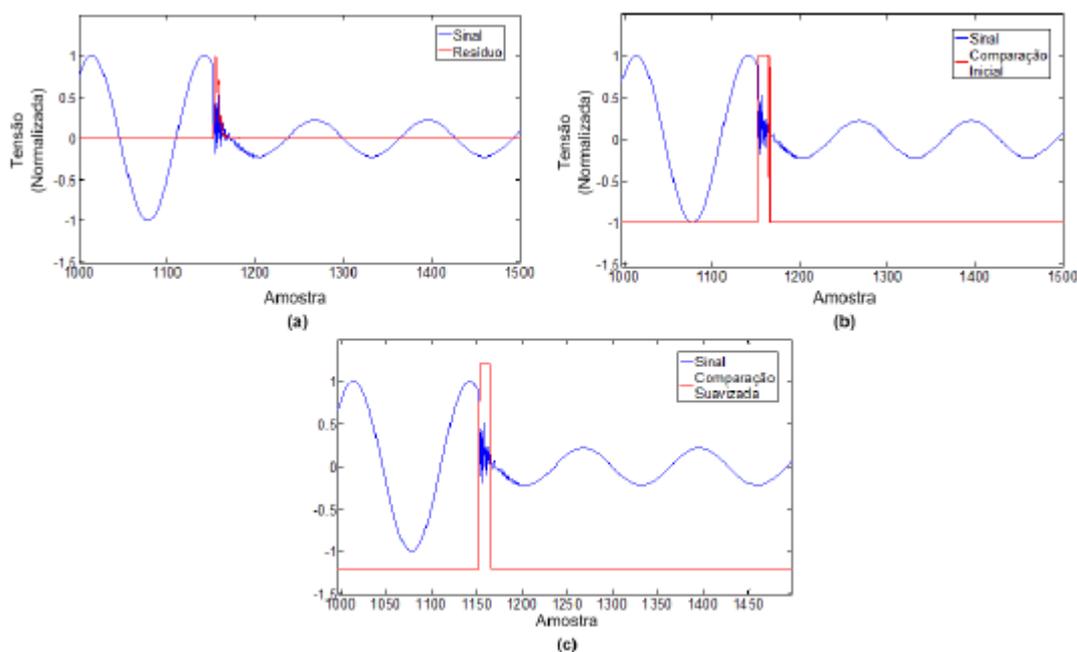


Figura 3.2 - Exemplos de segmentação para modelos utilizando Filtro de Kalman. Cálculo dos resíduos do sinal (a), seguido da limiarização através do cálculo automático do limiar (b). Suavização (c) da limiarização apresentada em (b)

3.3. MODELOS NEURAI AUTÔNOMOS

A seleção de entradas e o controle de complexidade de modelos neurais devem ser tratados de forma acoplada e conjunta, visto que o nível de não-linearidade disponibilizado pela estrutura neural está diretamente relacionado com o conjunto de entradas utilizado, principalmente para situações práticas onde poucos dados para treinamento são disponíveis. Neste sentido foi desenvolvido em [38] um modelo neural autônomo originalmente aplicado para previsão de carga. Contudo, a metodologia é diretamente aplicável à previsão de séries temporais de qualquer natureza, sendo utilizada neste trabalho para estimação das formas de onda de tensão e corrente visando identificar as variações abruptas no sinal relacionadas com ocorrência de eventos. O método desenvolvido é automático, analítico e acoplado tanto para seleção do espaço de entrada quanto para o controle de complexidade, incluindo a seleção do modelo.

Tomando por base o modelo *feedforward* comumente utilizado em previsão de carga, foi desenvolvido um método para automatização do processo de especificação e treinamento.

O método desenvolvido baseia-se na inferência *bayesiana* no treinamento de perceptrons de múltiplas camadas, do inglês multi-layered perceptrons – MLPs.

Em [38] são percorridos de forma inédita todos os níveis hierárquicos da inferência *bayesiana* baseada na maximização da evidência para MLPs, desde a estimação do conjunto de parâmetros até a seleção do modelo. A escolha de diferentes distribuições de probabilidade *a priori* para distintas variáveis de entrada dá origem a um procedimento de estimação da relevância de cada entrada conhecido como determinação automática de relevância (*automatic relevance determination* – ARD).

Técnicas baseadas na teoria do caos (teorema de *Takens*) são aplicadas para definição do espaço de entrada inicial. Para definição dos limiares de relevância, é desenvolvido um método original baseado na inserção artificial de variáveis aleatórias de prova, abdicando assim da intervenção de especialistas para a escolha dos sinais mais relevantes.

Uma das principais vantagens de modelos autônomos reside na sua capacidade de aproximação universal. Além disso, as estimativas analíticas para os parâmetros e hiperparâmetros do modelo apresentaram robustez no que tange ao desempenho do modelo. Métodos automáticos como o desenvolvido no referido trabalho [38] podem ser aplicados em setores diversos.

De uma forma geral, as técnicas apresentadas em [38] para desenvolvimento do método automático para seleção de entradas de modelos de sistemas caóticos podem ser resumidas no algoritmo a seguir:

1. Dado um conjunto de séries temporais, defina a série a ser detectada $y(k) \in \mathbb{R}$, $k = 1, 2, \dots, N$, e as séries exógenas $x_i(k) \in \mathbb{R}$, $k = 1, 2, \dots, N$, $i = 1, 2, \dots, S$, onde N responde pelo número de dados e S pelo número de séries disponíveis.
2. Utilizando o teorema de *Takens* e as técnicas apresentadas em [38], determine os parâmetros d_y e τ_y da imersão da série alvo no espaço aumentado $\underline{y}(k) \in \mathbb{R}^{d_y}$, dada pela equação (3-18) com $k = (d_y - 1)\tau_y + 1, (d_y - 1)\tau_y + 2, \dots, N$.

$$\underline{x}(t) = \begin{bmatrix} x(t) & x(t-\tau) & \dots & x(t-(d-1)\tau) \end{bmatrix}^t \quad (3-18)$$

3. Verifique a existência de traços caóticos em $\underline{y}(k) \in \mathbb{R}^{d_y}$ através da análise dos expoentes de *Lyapunov*, conforme apresentado em [38]. Existindo características caóticas, vá para o próximo passo. Do contrário, encerre o algoritmo e utilize alguma metodologia para estudo de sistemas não-caóticos.

4. Para cada série exógena $x_i(k) \in \mathbb{R}$, ou seja, para $i = 1, 2, \dots, S$, execute os seguintes passos:

4.1 Utilizando o teorema de *Takens* e as técnicas apresentadas em [38], determine os parâmetros d_{x_i} e τ_{x_i} da imersão da série exógena no espaço aumentado $\underline{x}_i(k) \in \mathbb{R}^{d_{x_i}}$, dada pela equação (3-18) com $k = (d_{x_i} - 1)\tau_{x_i} + 1, (d_{x_i} - 1)\tau_{x_i} + 2, \dots, N$.

4.2 Verifique a existência de sincronismo utilizando a estatística dos falsos vizinhos mais próximos mútuos, dada pela equação (3-19), e classifique o mesmo através da análise dos expoentes de *Lyapunov* condicionais, calculados utilizando os métodos apresentados em [38].

$$m[\underline{x}(t), \underline{y}(t), d, r] = \frac{\|\underline{x}'(t) - \underline{x}'[n(t, d')]\| \|\underline{y}(t) - \underline{y}[n(t, d)]\|}{\|\underline{x}'(t) - \underline{x}'[n(t, d)]\| \|\underline{y}(t) - \underline{y}[n(t, r)]\|} \quad (3-19)$$

4.3 Na existência de sincronismo fraco ou forte, armazene a imersão $\underline{x}_i(k) \in \mathbb{R}^{d_{x_i}}$ no conjunto de entradas. Do contrário, descarte essa série e retorne ao passo 4.1 para estudo da próxima série exógena.

5. Inclua no conjunto de entradas exógenas a imersão $\underline{y}(k) \in \mathbb{R}^{d_y}$ da série alvo.

6. Se o modelo de detecção for global, apresente o conjunto de entradas completo ao mesmo e realize detecções. Do contrário, particione o atrator reconstruído e obtenha os modelos locais de detecção.

No algoritmo listado acima, vale ressaltar a necessidade de existência de traços caóticos para utilização das técnicas em virtude dos pressupostos incluídos no desenvolvimento destas metodologias. Para modelagem e previsão de sistemas não-caóticos existem diversas metodologias consolidadas na literatura, tais como análise clássica de séries temporais.

A teoria do caos, no contexto do teorema de *Takens* em conjunto com o conceito de sincronismo generalizado, apresenta mecanismos para identificação não-linear de sistemas caóticos. Apesar de desenvolvida para estudo de sistemas dinâmicos, os métodos desenvolvidos nesta teoria podem ser aplicados a conjuntos de dados reais contaminados por ruído, com este componente estocástico sendo considerado como uma pequena contaminação de um processo essencialmente determinístico [38].

De posse do conjunto inicial de entradas, métodos de filtragem ou encapsulados são utilizados para processamento deste conjunto, visando redução de dimensionalidade através

da retirada de variáveis irrelevantes e/ou redundantes ou melhoria direta do desempenho do modelo.

Para evitar a explosão combinatorial resultante da solução do problema de seleção dos dados de entrada através de métodos encapsulados, a inclusão de ponderadores reais das entradas traz consigo a necessidade da definição de limiares de relevância a partir dos quais os sinais podem ser descartados. A definição empírica de tais patamares compromete a automação da técnica. Assim, sinais aleatórios de prova de natureza similar a das entradas utilizadas são inseridas. A técnica permite a obtenção empírica de limiares de relevância através de um teste de hipótese. O método busca selecionar somente as variáveis que apresentem relação superior com a saída em relação à variável de prova., isso faz com que a intervenção de especialistas na modelagem seja reduzida.

Definida a estrutura a ser utilizada, ou seja, número de camadas ocultas, número de neurônios por camada e tipo de função de ativação de cada neurônio, dado o conjunto $D = \{X, Y\}$, $X = \{\underline{x}_1, \dots, \underline{x}_N\}$, $Y = \{d_1, \dots, d_N\}$, $\underline{x} \in \mathbb{R}^n$, $\underline{x} = [x_1, \dots, x_n]^T$, $d \in \mathbb{R}$, $d = F(\underline{x}) + \zeta$, o objetivo do treinamento do modelo, sob o ponto de vista da inferência *bayesiana*, reside na determinação do vetor de parâmetros $\underline{w} \in \mathbb{R}^M$ que maximize a probabilidade *a posteriori* $p(\underline{w}|Y, X)$, dada por:

$$p(\underline{w}|Y, X) = \frac{p(Y|\underline{w}, X) p(\underline{w}|X)}{p(Y|X)} \quad (3-20)$$

Para determinação dos valores mais prováveis para os hiperparâmetros, a probabilidade *a posteriori* destes, $p(\alpha, \beta|Y)$, deve ser maximizada. Aplicando a regra de *Bayes*, é obtida a seguinte expressão para esta probabilidade:

$$p(\alpha, \beta|Y) = \frac{p(Y|\alpha, \beta) p(\alpha|\beta)}{p(Y)} \quad (3-21)$$

O algoritmo de treinamento *bayesiano* de MLP's pode ser resumido da forma que segue:

1. Faça $l = 0$.
2. Inicialize o vetor de parâmetros $\underline{w}(l)$ e os hiperparâmetros $\alpha(l)$ e $\beta(l)$.

3. Utilizando alguma técnica de otimização, atualize o vetor de parâmetros $\underline{w}(l+1)$ através da minimização do funcional $S(\underline{w})$ dado pela equação abaixo.

$$S(\underline{w}) = \frac{\beta}{2} \sum_{k=1}^N [d_k - f(\underline{x}_k, \underline{w})]^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^g \left(\alpha_i \sum_{j=1}^{M_i} w_{ij}^2 \right) \quad (3-22)$$

4. Se o critério de parada for atendido, encerre o algoritmo. Do contrário, vá para o passo 5.
5. Calcule a matriz *hessiana* $\underline{\underline{H}}(\underline{w})|_{\underline{w}=\underline{w}(l)}$.
6. Atualize os hiperparâmetros $\alpha_i(l+1)$ e $\beta(l+1)$, utilizando as equações (3-23) a (3-26) para $\alpha_i(l+1)$ e a equação (3-27) para $\beta(l+1)$, respectivamente.

$$\underline{\underline{B}}_i(l) = \left[\underline{\underline{A}}(\underline{w})|_{\underline{w}=\underline{w}(l)} \right]^{-1} \underline{\underline{I}}_i \quad (3-23)$$

$$\gamma_i(l+1) = M_i - \text{trace} \{ \underline{\underline{B}}_i(l) \} \quad (3-24)$$

$$\alpha_i(l+1) = \frac{\gamma_i(l+1)}{\|\underline{\underline{w}}_i(l)\|^2} \quad (3-25)$$

$$\gamma(l+1) = \sum_{i=1}^g \gamma_i(l+1) \quad (3-26)$$

$$\beta \sum_{k=1}^N [d_k - f(\underline{x}_k, \underline{w}^*)]^2 = N - \gamma \quad (3-27)$$

7. Faça $l = l+1$ e retorne ao passo 3.

Apesar de alguns pressupostos não verificados na prática, por exemplo aproximação *gaussiana* da probabilidade *a posteriori* de \underline{w} , o treinamento *bayesiano* apresenta como principal vantagem a estimativa automática dos diversos parâmetros de regularização, através do cálculo dos hiperparâmetros $\underline{\alpha}$ e β , evitando a necessidade de um conjunto de validação.

Além do procedimento analítico para estimativa dos parâmetros de regularização, este método fornece técnicas para seleção automática de entradas e avaliação de estruturas. Um agrupamento específico de pesos dá origem a uma metodologia para mensuração da importância de cada entrada conhecida como determinação automática de relevância (ARD), com o cálculo da evidência para o modelo fornecendo um índice para comparação entre diversas estruturas. Este índice pode ser utilizado para determinação do número de neurônios na camada oculta de MLPs. [38]

Visto que $p(Y)$ é um fator de normalização e admitindo que todas as hipóteses H_h são equiprováveis *a priori*, a evidência $p(Y|H_h)$ pode ser utilizada para avaliação de modelos, sendo selecionado aquele com maior probabilidade *a posteriori* $p(H_h|Y)$, ou seja, maior evidência.. Considerando MLPs com uma única camada oculta contendo m neurônios e utilizando uma aproximação *gaussiana* em torno dos hiperparâmetros $\underline{\alpha}$ e β obtidos no final do processo de treinamento, é obtida a seguinte expressão para $\ln p(Y|H_h)$:

$$\begin{aligned} \ln p(Y|H_h) = & -S(\underline{w}) - \frac{1}{2} \ln |\underline{A}(\underline{w})| + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^g M_i \alpha_i + \frac{N}{2} \ln \beta + 2 \ln m + \ln m! \\ & + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^g \ln \left(\frac{2}{\gamma_i} \right) + \frac{1}{2} \ln \left(\frac{2}{N - \gamma} \right) \end{aligned} \quad (3-28)$$

O cálculo da evidência para os modelos como mecanismo de seleção de estrutura reflete o caráter hierárquico da inferência bayesiana. A regra de Bayes foi aplicada para estimação dos parâmetros do modelo, supondo que os hiperparâmetros que regem as probabilidades *a priori* envolvidas eram conhecidos e sendo definida uma estrutura para o modelo. Visto que os hiperparâmetros também são desconhecidos, o fator de normalização $p(Y)$ presente na equação (3-20) nada mais é que a evidência para os hiperparâmetros, utilizada na regra de Bayes apresentada na equação (3-21) e maximizada posteriormente. Neste ponto, é suposto que o modelo é conhecido, o que não corresponde à realidade. Assim, a parcela $p(Y)$ presente no denominador da equação (3-21) é a evidência para os modelos, utilizada para seleção da estrutura e apresentada na equação (3-28). Desta forma, a evidência nos níveis inferiores do processo de estimação corresponde ao fator de normalização no estágio seguinte, realçando o aspecto hierárquico da inferência bayesiana.[38]

Neste trabalho, uma abordagem bayesiana ao problema de especificação e treinamento de MLPs estudado em [38] é utilizada para o desenvolvimento deste tipo de modelo para detecção de eventos em redes elétricas. Os resultados obtidos no segundo nível de inferência, relacionado com a estimação dos hiperparâmetros, são analisados em um procedimento de

seleção de entradas, oriundo da utilização de distribuições a priori definidas no método conhecido como determinação automática de relevância. O modelo alimentado somente com as entradas relevantes previamente selecionadas é então treinado novamente, com a evidência para este modelo sendo calculada. Finalmente, para realização da detecção, é utilizado o modelo que apresentar maior evidência. O algoritmo bayesiano para desenvolvimento de modelos neurais de detecção de eventos pode ser resumido da maneira que segue:

1. Escolha o número mínimo m_{min} e máximo m_{max} de neurônios na camada oculta.
2. Para $i = m_{min}, \dots, m_{max}$, faça:
 - 2.1. Insira variáveis de prova no conjunto de entradas original seguindo as distribuições de probabilidade apresentadas nas equações a seguir. Se as variáveis de entrada forem somente contínuas, insira somente o sinal de prova desta natureza. Do contrário, insira também a variável de prova discreta.

$$p(x_{PC}) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & \text{se } a \leq x_{PC} < b \\ 0, & \text{se } x_{PC} < a \text{ ou } x_{PC} > b \end{cases} \quad (3-29)$$

$$p(x_{PD}) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & \text{se } x_{PC} \in C \\ 0, & \text{se } x_{PC} \notin C \end{cases} \quad (3-30)$$

- 2.2. Estime o vetor de parâmetros \underline{w} e o conjunto de hiperparâmetros $\underline{\alpha}$ e β .
- 2.3. Separe os hiperparâmetros α_i associados a entradas contínuas e discretas em vetores distintos e ordene em ordem decrescente estes vetores.
- 2.4. Em cada vetor, selecione as variáveis de entrada situadas acima do respectivo limiar de relevância, α_C para variáveis contínuas e α_D para as discretas.
- 2.5. Utilizando somente as variáveis relevantes selecionadas no passo 2.4, estime novamente o vetor de parâmetros \underline{w} e o conjunto de hiperparâmetros $\underline{\alpha}$ e β .
- 2.6. Calcule o logaritmo natural da evidência do modelo, $\ln p(Y|H_h)$, dado pela equação (3-28).
3. Escolha o modelo e faça previsões (y_t) uma vez que a saída da rede neural é dada pelo valor esperado da saída desejada;

4. Para detecção de eventos, calcule a variância da saída desejada por meio da expressão (3-31):

$$\sigma_t^2 = \frac{1}{\beta} + g^T H^{-1} g \quad (3-31)$$

onde σ_t^2 representa a variância da saída da rede neural, β^{-1} a variância da distribuição a priori (hiperparâmetro calculado anteriormente – equação (3-27)), g o gradiente de $S(\underline{w})$ e \underline{H} a matriz hessiana de $S(\underline{w})$, todos calculados para o valor estimado de \underline{w} . O primeiro termo corresponde à contribuição do ruído intrínseco sobre os dados de saída e o segundo termo corresponde à contribuição da largura da distribuição à posteriori dos pesos da rede neural.

5. Considerando um nível de confiança especificado, calcule o intervalo de confiança para o valor previsto:

$$\left[y_t^{\min}, y_t^{\max} \right] = \left[y_t - \alpha \sigma_t, y_t + \alpha \sigma_t \right] \quad (3-32)$$

onde α representa o número de múltiplos do desvio padrão associados com o nível de confiança especificado. Por exemplo, considerando um nível de confiança de 99%, α é igual a três.

6. Se o valor recebido da oscilografia estiver dentro da faixa $\left[y_t^{\min}, y_t^{\max} \right]$, então não se trata de um evento.

Nesta seção foi apresentado de forma sucinta o método baseado em modelos neurais autônomo, técnica promissora na análise de situações práticas do dia-a-dia onde poucos dados para treinamento são disponíveis. Para maiores detalhes sugere-se a consulta do trabalho descrito em [38].

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os métodos utilizados para geração da base de dados de simulação de eventos, serão definidos os critérios e premissas que serão utilizados no desenvolvimento do trabalho e, além disso, serão apresentados os algoritmos a serem avaliados.

O desenvolvimento de um sistema de detecção de falhas requer a disponibilização de uma base de dados com registros de eventos para que o sistema possa extrair conhecimento a partir dos exemplos disponíveis.

Visto que não são disponibilizados registros reais de diferentes tipos de ocorrências no sistema em estudo, a base de dados necessária para o desenvolvimento do sistema de diagnóstico deve ser gerada por meio de simulação. Para tanto, devem ser realizadas as seguintes tarefas:

- ✓ construção de uma rede de simulação para representação dos diferentes tipos de falta;
- ✓ desenvolvimento de protótipo computacional para execução automática da simulação de cada falta;
- ✓ coleta dos diversos dados associados a cada ocorrência simulada.

4.1. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO SIMULADO NO ATP

O processo de desenvolvimento da rede elétrica equivalente para estudo dos fenômenos transitórios eletromagnéticos demanda que seja delimitada uma região elétrica do sistema tal que os fenômenos que ocorrem no sistema completo sejam reproduzidos de forma

confiável no sistema reduzido. A obtenção de equivalentes de curto-circuito de uma determinada região de uma rede elétrica é normalmente uma tarefa árdua, mas indispensável para que seja possível realizar estudos de transitórios eletromagnéticos em programas como o ATP[34]. Essa dificuldade se deve ao fato que, ao contrário do que ocorre com os programas de curto circuito e fluxo de potência, como é o caso dos programas *Análise de Falhas Simultâneas* (Anafas) e *Análise de Redes Elétricas* (Anarede) de propriedade do Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (Cepel), onde é possível a representação do sistema completo, no programa ATP é inviável que o mesmo seja feito, ou seja, no ATP não é viável que as simulações sejam realizadas com a modelagem de todo o sistema por diversos fatores como limitações do número de barras, disponibilidade e tempo de preparação dos casos e tempo de processamento.

Ressalta-se que na modelagem de uma rede elétrica equivalente para estudos de transitórios eletromagnéticos, dependendo do número de barras que compõem a rede elétrica equivalente, a tarefa de obtenção dos equivalentes de rede e ajuste das tensões internas de forma a aproximar o fluxo de potência da rede elétrica no ATP ao fluxo de potência obtido a partir do caso base no Anarede pode demorar vários dias ou mesmo semanas. E caso seja necessário realizar alteração no conjunto de barras retidas, seja no caso de fluxo ou no ano do caso, essa tarefa de ajuste tem que ser repetida.

Esta seção tem o objetivo de apresentar os critérios e o processo de desenvolvimento da rede elétrica equivalente a ser utilizada neste estudo.

O processo de redução de um Sistema de Potência, de forma que seja possível obter uma rede elétrica equivalente que possa representá-lo, pode ser dividido em 3 (três) partes, a saber:

- Barras retidas;
- Barras de fronteiras;
- Conexões de transferência.

As barras retidas é a parte da rede elétrica que é representada por todas as barras que compõem a rede elétrica equivalente, incluindo as barras de fronteira.

As barras de fronteira, delimitam uma região, são os limites da rede elétrica equivalente. São nas barras de fronteira que estão localizadas as impedâncias de Thévenin que representam a contribuição do Sistema de Potência naquela barra, denominados de equivalentes próprios. Os equivalentes próprios, alimentados por uma fonte de tensão com o mesmo nível de tensão ao qual foi originado, permitem reproduzir a contribuição de potência de curto-circuito do sistema naquele ponto. Ressalta-se que essa contribuição é referente apenas à parte do sistema externo, ou seja, à contribuição das barras retidas não são consideradas.

As conexões de transferência são as conexões que surgem entre as barras de fronteira resultado da redução do Sistema de Potência. São essas conexões que preservam uma característica importante do sistema elétrico interligado. As conexões de transferências são representadas por impedâncias de transferência obtidas a partir do equivalente de Thévenin entre as barras de fronteiras consideradas. As impedâncias de transferências representam as conexões que surgem entre as barras de fronteira devido à redução do sistema.

4.1.1. Base de dados

A partir dos conceitos apresentados, é definido um horizonte do Sistema Elétrico de Potência que será utilizado como base de dados para a obtenção da rede elétrica equivalente. O Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro (ONS) disponibiliza em seu portal na internet (www.ons.org.br) uma base de dados que representa a topologia do sistema elétrico para diversos horizontes. Cada base de dados define os elementos que estarão em operação na rede elétrica para o respectivo horizonte. A base de dados de curto-circuito e fluxo de potência a ser utilizada na obtenção da rede elétrica equivalente e ajuste do fluxo de potência é referente ao horizonte de Dezembro de 2014 [66], [67].

4.1.2. Rede elétrica equivalente

A rede elétrica equivalente foi definida para atender aos estudos que serão realizados na LT 500 kV Tijuco Preto – Cachoeira Paulista. As barras das subestações 500kV Tijuco Preto e Cachoeira Paulista são os pontos de partida para definir a rede elétrica equivalente. Os procedimentos de rede do ONS [68] classificam essas subestações, que fazem parte da região que será estudada, como “Barras Zero”, e a partir delas o sistema da rede elétrica equivalente precisa atender no mínimo duas barras além dessa região onde se localizam as Barras Zero. Esse é um critério que busca dar uma orientação básica quanto à definição da rede que será

equivalentada, e ao aplicá-la, é necessário analisar outros conceitos importantes nos estudos dos fenômenos eletromagnéticos. Um conceito importante nesse sentido é a distância elétrica entre uma barra e outra. Distanciar duas barras além da região de estudo pode implicar, em alguns casos, em estar limitando a rede equivalente a uma região eletricamente curta. Considera-se uma distância elétrica adequada na representação dos fenômenos transitórios um raio aproximado de 500 km a partir da região que será estudada.

A Figura 4.1 apresenta, de forma simplificada, o diagrama unifilar da rede elétrica equivalente, destacando a região de estudo, ou seja, as Barras Zero. A rede elétrica equivalente foi desenvolvida graficamente no programa Sistema de Análise e Projeto de Redes Elétricas (SAPRE) versão 2.3, que é um programa integrado ao programa Anafas.

A Tabela 4-1 apresenta a comparação dos níveis de curto-circuito medidos com o modelo da rede desenvolvida no Anafas e no ATP. Essa comparação dos níveis de curto-circuito tem o objetivo de avaliar a robustez do modelo desenvolvido no ATP. Ressalta-se que, devido ao fato do Anafas e o ATP apresentarem ambientes de simulação com propósitos e características de modelagens dos elementos elétricos distintas, na comparação dos níveis de curto-circuito entre um modelo e o outro é tradicionalmente admitido uma diferença percentual de até 5% (cinco por cento) entre as medições.

Tabela 4-1 - Validação da modelagem da rede no ATP: Comparação dos níveis de curto-circuito

Barra		Trifásico (kA)			Monofásico (kA)		
Nome	Tensão (kV)	Anafas	ATP	Erro (%)	Anafas	ATP	Erro (%)
Cachoeira Paulista	500	26,67	26,87	0,7	19,72	19,75	0,15
Tijuco Preto	500	23,93	24,08	0,6	23,82	24,24	1,76

4.1.1. Sobre o programa de detecção de faltas em linhas de transmissão no Matlab

Para representação dos diferentes tipos de defeitos na LT em estudo - Cachoeira Paulista - Tijuco Preto, é necessário estabelecer os parâmetros a serem variados juntamente com seus possíveis valores para que assim seja estabelecida uma árvore de falhas fidedigna. Quando ocorre um curto circuito em uma linha de transmissão, por exemplo, são gerados nela surtos de tensão e corrente que se propagam em ambas as direções rumo aos seus terminais de acordo com a velocidade de propagação do surto da linha. Tais surtos se comportam como

ondas viajantes e sofrem reflexões e refrações devido às discontinuidades do sistema, esse processo de reflexões sucessivas se repete até que seja alcançada a condição de regime permanente associado ao distúrbio.

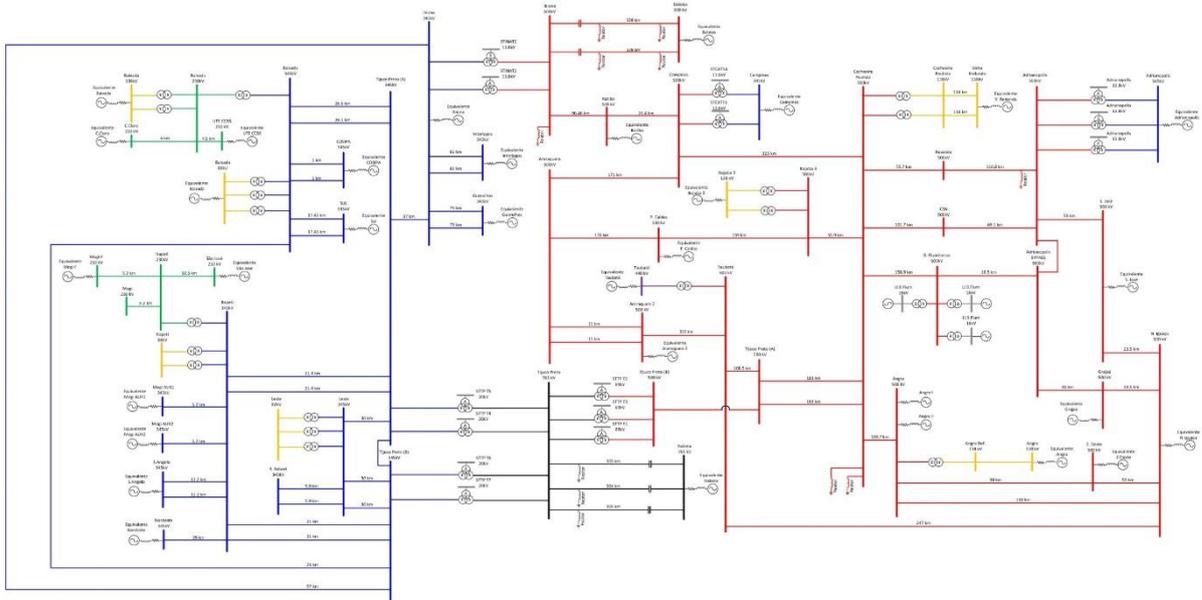


Figura 4.1 - Configuração da rede adotada nos estudos de transientes eletromagnéticos

O desempenho de uma ferramenta em termos de diagnóstico está diretamente relacionado com a capacidade de modelagem dos componentes da rede e dos diferentes cenários de faltas, realizada através da inserção correta dos dados no sistema de simulação que se deseja avaliar. Neste sentido, apresentou-se em [36] um razoável espectro de valores para os parâmetros que efetivamente influenciam o comportamento das oscilografias de tensão e corrente na ocorrência de diferentes tipos de curto-circuito, conforme listados a seguir:

- Tipo e resistência de falta;
- Localização da falta;
- Ângulo de incidência da falta (fase da tensão no momento da falta);
- Variação do ponto de operação do sistema, através da variação do fluxo de potência do sistema.

A faixa de variação para cada um desses parâmetros, como também a representação dos diferentes tipos de falta, são apresentadas em [36] e detalhadas neste trabalho no item 4.3.2.

Importante salientar que o sistema equivalente considera a impedância de transferência entre os terminais de Cachoeira Paulista e Tijuco Preto, além do conjunto único de chaves para simular qualquer ponto de falta.

4.2. DESCRIÇÃO DOS CASOS DE QUALIDADE DE ENERGIA SIMULADOS NO MATLAB

Conforme já discutido no item anterior, a maior dificuldade em realizar pesquisas nesta área é a falta de um conjunto de dados sólidos sob o efeito das perturbações nos sistemas, no que tange tanto aos sistemas de transmissão quanto aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Portanto, faz-se uso de modelagem de sistemas testes, nos quais se podem realizar simulações destes eventos, fornecendo dados a serem utilizados na avaliação das metodologias contribuindo para as pesquisas e a automação das subestações de energia elétrica.

Neste contexto, baseando-se no modelo teórico proposto por [37], foram formulados 04 eventos de qualidade de energia no programa Matlab. A Tabela 4-2, apresenta as equações algébricas utilizadas para simulação de cada distúrbio.

A vantagem de se utilizar expressões algébricas para representar eventos de qualidade de energia está na flexibilidade de representação dos eventos, visto que é possível cobrir uma vasta gama de variações.

4.3. DESCRIÇÃO DAS ESPECIFICAÇÕES NECESSÁRIAS PARA AS TÉCNICAS UTILIZADAS

Nas seções anteriores foram apresentados o processo de obtenção da rede elétrica equivalente para estudo do sistema CPTe e a formulação matemática dos eventos de qualidade de energia na rede elétrica. Nesta seção encontram-se os detalhes da modelagem dos sistemas.

4.3.1. Sistema de transmissão no ATP

A caracterização da rede elétrica se dá através dos principais elementos elétricos que a compõe, ou seja, através das linhas de transmissão, transformadores, elementos shunts, unidades geradoras e, no caso de redes equivalentes, os equivalentes próprios e impedâncias de transferências. Portanto, nesta seção serão apresentados os parâmetros elétricos dos elementos que compõem a rede elétrica equivalente.

Tabela 4-2 – Equações algébricas dos distúrbios (adaptado de [37])

Evento	Equação
Senóide Pura	$v(t) = \text{sen}(wt)$
Swell	$v(t) = A(1 + \alpha(u(t_2) - u(t_1)))\text{sen}(wt)$
Sag	$v(t) = A(1 - \alpha(u(t_2) - u(t_1)))\text{sen}(wt)$
Harmônicos	$v(t) = A(\alpha_1\text{sen}(wt) + \alpha_3\text{sen}(3wt) + \alpha_5\text{sen}(5wt) + \alpha_7\text{sen}(7wt))$
Outage	$v(t) = A(1 - \alpha(u(t_2) - u(t_1)))$
Swell com Harmônicos	$v(t) = A(1 + \alpha(u(t_2) - u(t_1)))(\text{sen}(wt) + \alpha_3\text{sen}(3wt) + \alpha_5\text{sen}(5wt) + \alpha_7\text{sen}(7wt))$
Sag com Harmônicos	$v(t) = A(1 - \alpha(u(t_2) - u(t_1)))(\text{sen}(wt) + \alpha_3\text{sen}(3wt) + \alpha_5\text{sen}(5wt) + \alpha_7\text{sen}(7wt))$

4.3.1.1. Linhas de transmissão

A teoria das linhas de transmissão estabelece a ponte entre a análise dos campos eletromagnéticos e a teoria dos circuitos. O fenômeno de propagação de ondas em linhas de transmissão pode ser abordado como uma extensão da teoria dos circuitos ou como uma especialização das equações de Maxwell. A diferença fundamental entre a teoria dos circuitos e a teoria da linha de transmissão é o comprimento elétrico. Na teoria dos circuitos as dimensões físicas são muito menores que o comprimento de onda, enquanto que na teoria das linhas de transmissão a distância é uma fração considerável do comprimento de onda. A linha de transmissão é vista como um circuito de parâmetros distribuídos, em que a tensão e a corrente variam em amplitude e fase ao longo da linha. Devido ao fenômeno de propagação de ondas, a representação da linha de transmissão, dependendo do tipo de estudo a ser realizado, pode exigir uma representação mais detalhada. Para as linhas de transmissão que fazem parte da rede elétrica equivalente apresentada nesse relatório, com exceção da LT 500 kV Tijuco Preto e Cachoeira Paulista, foram adotados os seguintes modelos:

- Modelo PI equivalente (LINEPI3S) para linhas de transmissão com comprimento menor ou igual a 20 km;
- Modelo a parâmetros distribuídos idealmente transpostos (LINEZT_3) para linhas de transmissão com comprimento superior a 20 km.

A Tabela 4-3 apresenta os parâmetros das linhas de transmissão da rede elétrica equivalente que foram modeladas no ATP. As informações contidas na respectiva tabela são provenientes da base de dados de curto circuito [69] e complementada com a base de dados de fluxo de potência [70] disponibilizadas pelo ONS.

Tabela 4-3 – Dados das linhas de transmissão

Barra De	Barra Para	V (kV)	L (km)	R ₁ (Ω/km)	X ₁ (Ω/km)	B ₁ (μS/km)	R ₀ (Ω/km)	X ₀ (Ω/km)	B ₀ (μS/km)
T. PRETO 765	ITABERA 765	765	312,0	0,0146	0,3359	4,9355	0,2588	1,0056	2,9613
T. PRETO 765	ITABERA 765	765	305,0	0,0138	0,3360	4,9161	0,1612	1,3529	2,9497
T. PRETO 765	ITABERA 765	765	304,0	0,0139	0,3371	4,9070	0,1617	1,3535	2,9442
BATEIAS 525	A#IB BA 525A	525	328,0	0,0260	0,3336	4,9205	0,3202	1,4521	2,9523
BATEIAS 525	A#IB BA 525C	525	328,0	0,0260	0,3336	4,8763	0,3202	1,4521	2,9258
ARARAQ2 500	TAUBATE 500	500	333,0	0,0173	0,3033	5,6601	0,2417	1,0113	3,3960
TAUBATE 500	N.IGUACU 500	500	247,0	0,0187	0,3123	3,7129	0,3611	1,2986	2,2277
CAMPINAS500	C. PAULI.500	500	223,0	0,0225	0,3476	4,7516	0,1962	1,5337	2,8509
C. PAULI.500	T. PRETO 500A	500	181,0	0,0231	0,3508	4,7294	0,2841	1,1290	2,8376
C. PAULI.500	T. PRETO 500A	500	181,0	0,0173	0,2642	4,7867	0,3619	1,3428	2,8720
C. PAULI.500	B.FLUMIN 500	500	177,4	0,0138	0,2363	5,6830	0,2141	1,0815	3,4098
P. CALDAS500	ARARAQ. 500	500	176,0	0,0223	0,3461	4,7386	0,1800	1,4626	2,8432
C. PAULI.500	A#CSN 500	500	171,8	0,0131	0,2081	2,8205	0,1732	0,6854	1,6923
ARARAQ. 500	CAMPINAS500	500	171,0	0,0219	0,3496	4,7392	0,1886	1,5016	2,8435
P. CALDAS500	ITAJUBA3-500	500	139,0	0,0234	0,3597	4,6576	0,1978	1,5468	2,7945
RESENDE 500	ADRIANO.500	500	117,8	0,0210	0,3456	4,6392	0,2880	1,1099	2,7835
ANGRA 500	N.IGUACU 500	500	110,0	0,0255	0,4025	4,7709	0,3050	1,3666	2,8625
T. PRETO 500A	TAUBATE 500	500	108,5	0,0244	0,3321	4,9164	0,3833	1,1881	2,9498
C. PAULI.500	ANGRA 500	500	103,7	0,0224	0,3520	4,6133	0,1977	1,4778	2,7680
ANGRA 500	Z. OESTE 500	500	98,0	0,0204	0,3393	4,8808	0,3495	1,1888	2,9285
ITATIBA 500	IBIUNA---500	500	86,5	0,0228	0,3487	4,7310	0,3649	1,4299	2,8386
C.PAULI.500	TAUBATE 500	500	83,0	0,0208	0,3190	4,8149	0,2127	1,1937	2,8890
A#CSN 500	ADRIANO.500	500	70,1	0,0214	0,3531	4,6762	0,2354	1,2482	2,8057
C.PAULI.500	ITAJUBA3-500	500	55,9	0,0224	0,3533	4,9631	0,1923	1,5116	2,9779
C.PAULI.500	RESENDE 500	500	55,7	0,0229	0,3510	4,7756	0,3200	1,0637	2,8654
N.IGUACU 500	Z. OESTE 500	500	55,0	0,0186	0,2559	5,1825	0,2614	0,7159	3,1095
AD BYPASS500	GRAJAU 500	500	55,0	0,0155	0,3182	5,3673	0,3227	1,3273	3,2204
GRAJAU 500	N.IGUACU 500	500	39,5	0,0329	0,5589	6,4952	0,5665	1,8513	3,8971
ADRIANO.500	S.JOSE 500	500	33,0	0,0152	0,3106	5,3697	0,2500	1,0833	3,2218
CAMPINAS500	ITATIBA 500	500	26,5	0,0226	0,3466	5,1375	0,3627	1,4196	3,0825
N.IGUACU 500	S.JOSE 500	500	23,5	0,0074	0,1585	5,5285	0,1255	0,5160	3,3171

B.FLUMIN 500	AD BYPASS500	500	18,5	0,0162	0,2608	6,4212	0,3108	1,1486	3,8527
T. PRETO 500A	T. PRETO 500B	500	1,0	-	3,0000	-	-	0,3000	-
ARARAQ2 500	ARARAQ. 500	500	15,0	0,0167	0,3217	5,0997	0,2067	0,9683	3,0598

Tabela 4-4 – Dados das linhas de transmissão (continuação)

Barra De	Barra Para	V (kV)	L (km)	R ₁ (Ω/km)	X ₁ (Ω/km)	B ₁ (μS/km)	R ₀ (Ω/km)	X ₀ (Ω/km)	B ₀ (μS/km)
ARARAQ2 500	ARARAQ. 500	500	15,0	0,0167	0,3217	5,0997	0,2067	0,9683	3,0598
AD BYPASS500	ADRIANO.500	500	1,0	-	0,2500	-	-	0,2500	-
T. PRETO 345A	IBIUNA 345	345	97,0	0,0172	0,2895	5,2055	0,1962	1,0151	3,1233
T. PRETO 345B	IBIUNA 345	345	97,0	0,0173	0,2895	5,7330	0,2026	0,9527	3,4398
GUARULH.345B	IBIUNA 345	345	75,0	0,0173	0,2898	5,7332	0,2769	1,1444	3,4399
GUARULH.345B	IBIUNA 345	345	75,0	0,0173	0,2895	5,7332	0,2815	1,1207	3,4399
IBIUNA 345	INTERLAG345	345	61,0	0,0176	0,3005	5,2807	0,3571	1,2351	3,1684
IBIUNA 345	INTERLAG345	345	61,0	0,0176	0,3005	5,2807	0,3571	1,2351	3,1684
T. PRETO 345B	LESTE 345	345	30,0	0,0397	0,3928	4,7813	0,3610	1,1625	2,8688
T. PRETO 345B	LESTE 345	345	30,0	0,0397	0,3729	4,7813	0,3452	1,2061	2,8688
T. PRETO 345A	LESTE 345	345	29,9	0,0398	0,3782	4,7973	0,3503	1,2181	2,8784
ITAPETI 345	NORDESTE345	345	29,0	0,0341	0,3599	5,2148	0,2360	1,0622	3,1289
BAIXADA 345	T. PRETO 345A	345	26,5	0,0359	0,3638	4,7169	0,3548	1,1408	2,8302
BAIXADA 345	T. PRETO 345A	345	26,1	0,0365	0,3922	4,7886	0,3375	1,2131	2,8730
T. PRETO 345B	BAIXADA 345	345	26,0	0,0366	0,3937	4,3759	0,2609	0,9339	2,6256
T. PRETO 345A	ITAPETI 345	345	21,4	0,0389	0,3671	5,0429	0,3393	1,2069	3,0258
T. PRETO 345A	ITAPETI 345	345	21,4	0,0389	0,3671	5,0429	0,3393	1,2069	3,0258
SUL 345	BAIXADA 345	345	21,3	0,0341	0,3553	4,5426	0,2333	1,0479	2,7256
T. PRETO 345B	ITAPETI 345	345	21,0	0,0340	0,3571	5,1390	0,2381	1,0599	3,0834
T. PRETO 345B	ITAPETI 345	345	21,0	0,0340	0,3571	5,1390	0,2381	1,0599	3,0834
SUL 345	BAIXADA 345	345	17,4	0,0417	0,4337	5,5459	0,2848	1,2793	3,3276
SANGELO 345	ITAPETI 345	345	13,2	0,0415	0,3667	4,2886	0,3699	1,4942	2,5732
SANGELO 345	ITAPETI 345	345	13,2	0,0415	0,3667	4,2886	0,3699	1,4942	2,5732
LESTE 345	R.REBERT345	345	5,9	0,0202	0,3026	5,8811	0,2421	0,8876	3,5287
LESTE 345	R.REBERT345	345	5,9	0,0202	0,3026	5,8811	0,2421	0,8876	3,5287
ITAPETI 345	MOGI AUX1	345	5,2	0,0458	0,3662	4,2977	0,3433	1,2360	2,5786
ITAPETI 345	MOGI AUX2	345	5,2	0,0458	0,3662	4,2977	0,3433	1,2360	2,5786
T. PRETO 345A	T. PRETO 345B	345	1,0	-	14,92	-	-	14,9972	-
BAIXADA 345	COSIPA 345	345	1,0	0,1190	1,4283	-	0,9522	4,1659	-
BAIXADA 345	COSIPA 345	345	1,0	0,1190	1,4283	-	0,9522	4,1659	-
ITAPETI 230	SAO JOSE230	230	50,5	0,0534	0,2933	4,6155	0,3740	1,4665	2,7693
SAO JOSE230	MOGI-F 230	230	0,0	0,0518	0,2846	4,1437	0,3851	1,3680	2,4862
ITAPETI 230	MOGI-F 230	230	5,2	0,0610	0,3357	4,5805	0,4578	1,6277	2,7483
MOGI 230	ITAPETI 230	230	5,2	0,0203	0,0610	4,5805	0,0814	0,3255	2,7483
BAIXADA 230	UTE CCBS 230	230	4,5	0,0353	0,2704	3,0414	0,2586	1,0815	1,8248
BAIXADA 230	C. CLORO 230	230	6,0	0,0088	0,1146	3,1405	0,0882	0,3968	1,8843
C. PAULI 138	VREDONDA138	138	114,0	0,0723	0,4206	3,3441	0,4763	1,4400	2,0064
C. PAULI 138	VREDONDA138	138	114,0	0,0727	0,4216	3,3441	0,4901	1,4390	2,0064

Quando o estudo inclui linhas de transmissão que necessitam de uma modelagem detalhada dos acoplamentos eletrostáticos e eletromagnéticos envolvidos, deve-se referenciar o tipo de modelagem adotada, juntamente com os dados de entrada utilizados no processamento da rotina “Line and Cable Constants” (LCC) do programa ATP, informando os dados de projeto básico da linha (geometria torre típica, características do cabo fase, cabos para-raios e flechas) e os esquemas de transposição. Isso acontece em linhas de circuito duplo ou em linhas que correm em paralelo dividindo a mesma faixa de passagem, que é o caso da LT 500 kV Tijuco Preto – Cachoeira Paulista.

As subestações de Tijuco Preto e Cachoeira Paulista são interligadas por duas linhas de transmissão em 500 kV de circuito simples que dividem a mesma faixa de passagem. As duas linhas de transmissão, apesar de serem do mesmo nível de tensão (500 kV), apresentam características geométricas diferentes. A LT 500 kV Tijuco Preto – Cachoeira Paulista circuito 1 (um) é de propriedade de Furnas e apresenta espaçamento entre subcondutores num mesmo feixe de 45,72 cm. As características básicas e geométricas dessa linha foram obtidas através da Biblioteca de Linhas de Transmissão do Sistema FURNAS. O circuito 2 (dois) da LT 500 kV Tijuco Preto – Cachoeira Paulista é de propriedade da Cachoeira Paulista Transmissora de Energia (CPTE) e apresenta espaçamento entre subcondutores num mesmo feixe de 120,0 cm. As características básicas e geométricas dessa linha foram disponibilizadas pelo proprietário através dos documentos referentes ao projeto básico da respectiva linha que constam em [72].

A Tabela 4-5 e a Tabela 4-6 apresentam as principais informações sobre as características básicas e geométricas das LTs 500 kV Tijuco Preto – Cachoeira Paulista, circuitos 1 e 2. Além disso, é apresentado na Figura 4.2 a disposição geométrica dos circuitos 1 e 2 das LTs 500 kV Tijuco Preto – Cachoeira Paulista.

Tabela 4-5 – Características básicas das linhas de transmissão 500kV Tijuco Preto – Cachoeira Paulista

Linha de Transmissão	V (kV)	L (km)	Feixe Condutor		Para-Raios	
			Nº	Nome	Cabo	Ligação
C. Paulista – T. Preto C1	500	181	3	Rail	Aço 7/16	Aterrado
C. Paulista – T. Preto C2	500	181	4	Rail	Aço 3/8 e OPGW 34A68S	Aterrado

Tabela 4-6 – Características geométricas das torres de transmissão das LTs 500kV Tijuco Preto – Cachoeira Paulista

Distância horizontal ao eixo da torre (m)					Altura média dos cabos (m)				Distância no meio do vão (m)	
Circuito	Fase A	Fase B	Fase C	Para-Raios	Fase A	Fase B	Fase C	Para-Raios	Cabo Fase	Para-Raios
1	-10,0	0	10,0	±8,65	26,5	31,9	26,5	42,6	9,5	30,16
2	-9,45	0	-9,45	±10,0	26,6	33,6	26,6	37,6	11	23,56

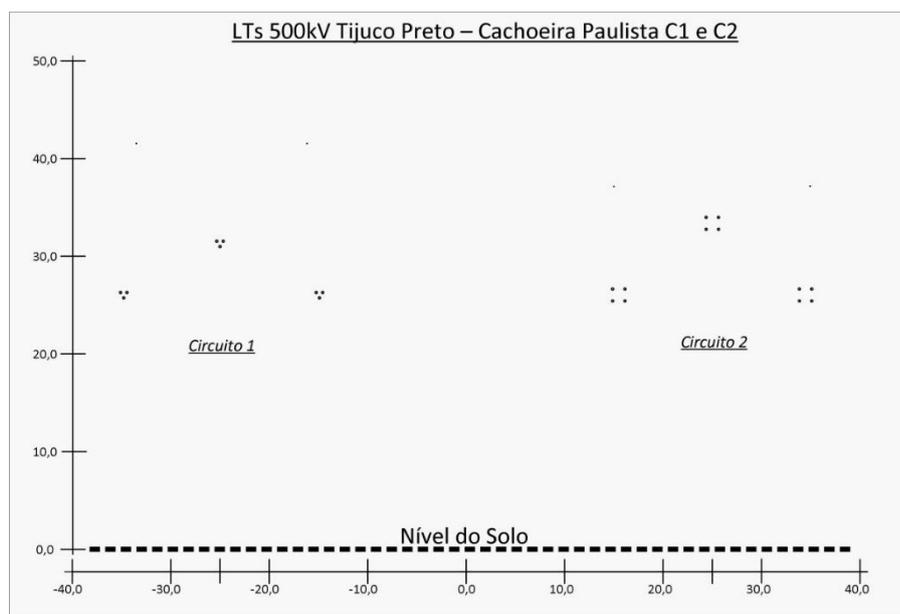


Figura 4.2– Representação geométrica das LTs 500 kV T. Preto – C. Paulista C1 e C2

4.3.1.1. Transformadores

Os transformadores da rede elétrica equivalente representados no ATP são do tipo SatTrafo, cuja característica principal é a possibilidade da inserção da curva de saturação. A Tabela 4-7 apresenta os dados dos transformadores da rede elétrica equivalente mostrada na Figura 4.1.

Tabela 4-7– Dados dos transformadores

Subestação	V _p (kV)	V _s (kV)	V _t (kV)	Conexão	X _p (Ω)	X _s (Ω)	X _t (Ω)
Tijuco Preto	765	500	69	YYΔ	47,6081	-4,0750	5,1683
	765	500	69	YYΔ	40,7902	-0,7500	5,0633
	765	500	69	YYΔ	48,8663	-4,3500	5,3147
	765	345	20	YYΔ	57,0302	-0,9760	0,3128
	765	345	20	YYΔ	60,3074	-1,3450	0,2984
	765	345	20	YYΔ	58,0251	-0,8332	0,3070
	765	345	20	YYΔ	54,4610	-0,6903	0,3086
Campinas	500	345	13,8	YYΔ	74,7000	-6,4631	1,0291
	500	345	13,8	YYΔ	73,5250	-6,2012	1,0335

Adrianópolis	500	345	13,8	YYΔ	73,0500	-3,2375	1,0319
	500	345	13,8	YYΔ	54,0750	3,3208	1,0323
	500	345	13,8	YYΔ	80,7000	-6,4274	1,0438
C. Paulista	500	138	-	YY	120,0000	0,1333	-
	500	138	-	YY	120,0000	0,1333	-
Itajubá 3	500	138	-	YY	128,7500	-0,9141	-
	500	138	-	YY	128,7500	-0,9141	-
Taubaté	500	440	-	YY	33,2500	-5,8080	-
Angra	500	138	-	YY	97,7500	-0,3237	-
Ibiúna	500	345	13,8	YYΔ	49,5125	-2,8804	0,4072
	500	345	13,8	YYΔ	49,5125	-2,8804	0,4072
B. Fluminense	500	18	-	YΔ	67,8750	0,2639	-
	500	18	-	YΔ	67,8750	0,2639	-
	500	18	-	YΔ	67,8750	0,2639	-
Leste	345	88	-	YY	37,8500	2,4548	-
	345	88	-	YY	37,8500	2,4548	-
	345	88	-	YY	37,6119	2,4394	-
Itapeti	345	230	-	YY	20,2343	-0,6348	-
	345	88	-	YΔ	33,7626	6,5900	-
	345	88	-	YΔ	33,7626	6,5900	-
B. Santista	345	230	-	YY	20,4723	-0,6348	-
	345	88	-	YY	33,4460	2,1761	-
	345	88	-	YY	33,5651	2,1838	-
	345	88	-	YY	33,0890	2,1528	-
	230	138	-	YY	44,9121	-1,3140	-
	230	138	-	YY	44,9121	-1,3140	-

4.3.1.2. Reatores

Os elementos reatores Shunts foram modelados no ATP utilizando o modelo RLC3. Nesse elemento os valores de R e C são nulos e o valor de L é correspondente à potência nominal do reator. A Tabela 4-8 e a Tabela 4-9 apresentam, respectivamente, os dados dos reatores de linha e reatores de barra.

4.3.1.3. Unidades geradoras

As unidades geradoras foram representadas no ATP por uma fonte de tensão ideal (Fonte ACSOURCE) atrás da reatância subtransitória. As reatâncias são representadas através do elemento LINESY_3. Os dados das unidades geradoras da rede elétrica equivalente são mostrados na Tabela 4-10.

Tabela 4-8 – Dados dos reatores de linha de transmissão

Barra De	Barra Para	Tensão (kV)	Lado	Circuito	Potência Reativa (Mvar)
Araraquara	P. Caldas	500	De	1	-73,0
Araraquara	Campinas	500	De	1	-73,0
P. Caldas	Itajubá	500	De	1	-136,0
Taubaté	N. Iguaçu	500	De	1	-73,5
Taubaté	N. Iguaçu	500	Para	1	-73,5
T. Preto	Itaberá	765	De	1	-330,0
T. Preto	Itaberá	765	De	2	-330,0
T. Preto	Itaberá	765	De	3	-330,0
Ibiúna-1-500	Bateias1-500	500	De	1	-87,0
Ibiúna-1-500	Bateias1-500	500	Para	1	-136,0
Ibiúna-2-500	Bateias2-500	500	De	2	-87,0
Ibiúna-2-500	Bateias2-500	500	Para	2	-136,0

Tabela 4-9 - Dados dos reatores de barra

Barra	Tensão (kV)	Unidades	Potência Reativa (Mvar)
Cachoeira Paulista	500	1	-136,0
Campinas	13,8	2	-50,0
Angra	138	1	25,0
Itaberá	765	1	-330,0
Adrianópolis	500	1	-136,0

Tabela 4-10 - Dados das unidades geradoras

Barra	Tensão (kV)	R0 (Ω)	X0 (Ω)	R1 (Ω)	X1 (Ω)
ANGRA 500	500	-	53,5000	-	155,5000
ANGRA 500	500	-	26,7500	-	78,0000
IBIUNA 345	345	-	11,9025	-	30,7085
STTP T4 20	20	-	0,0992	-	0,2992
U.B.FLUM 18A	18	-	0,2722	-	0,2722
U.B.FLUM 18B	18	-	0,2722	-	0,2722
U.B.FLUM 18C	18	-	0,2657	-	0,2657

4.3.1.4. Equivalentes

As informações elétricas associadas à redução do sistema, de forma a se obter a rede elétrica equivalente desejada, se apresentam através de impedâncias de Thévenin vistas do ponto que se deseja calcular essa impedância ou entre dois pontos que se tenha conexão.

Os equivalentes próprios são as impedâncias associadas às barras de fronteira, que correspondem à contribuição do Sistema de Potência vista daquele ponto, desconsiderando a

contribuição da rede retida, conforme foi explicado no item 4.1. Assim como as unidades geradoras descritas no item anterior, os equivalentes próprios também foram representados no ATP por uma fonte de tensão ideal (Fonte ACSOURCE) atrás das impedâncias de Thevenin representadas pelo elemento LINESY_3. As impedâncias de transferências correspondem às conexões que surgem entre as barras de fronteira devido à redução do sistema.

A Tabela 4-11 e a Tabela 4-12 apresentam respectivamente os dados dos equivalentes próprios e das impedâncias de transferência referente à rede elétrica equivalente.

Tabela 4-11 – Dados dos equivalentes próprios

Barra	Tensão (kV)	R0 (Ω)	X0 (Ω)	R1 (Ω)	X1 (Ω)
ITABERA 765	765	18,5446	122,2418	2,6253	50,6296
BATEIAS 525	525	2,2430	19,0647	2,0101	26,7621
P.CALDAS500	500	5,6560	88,9575	2,5933	69,9575
ARARAQ. 500	500	13,5075	121,0775	2,2068	43,5275
GRAJAU 500	500	0,0245	30,0175	1,3208	147,2675
S.JOSE 500	500	8,7733	79,3600	2,0028	76,0350
Z. OESTE 500	500	37,1050	217,1375	-0,6150	95,1275
ITATIBA 500	500	3,7898	108,2425	80,0000	440,7500
ARARAQ2 500	500	0,4145	13,2520	2,3065	46,1625
N.IGUACU 500	500	6,0890	91,6725	-3,0025	170,3825
TAUBATE 440	440	8,3066	74,2030	16,2185	227,4219
CAMPINAS345	345	1,4014	34,6934	9,7082	82,5081
GUARULH.345B	345	1,5791	11,7785	7,5755	82,2617
MOGI AUX1	345	133,5222	1083,6750	59,4732	795,8012
MOGI AUX2	345	133,5222	1083,6750	59,4732	795,8012
ADRIANO.345	345	3,3616	27,5721	1,7682	22,9040
SANGELO 345	345	1,7117	21,9756	1,9646	45,1224
COSIPA 345	345	0,0000	28,2827	0,0000	750,4526
NORDESTE345	345	0,0304	22,6171	193,5466	1050,2409
SUL 345	345	0,2708	16,0934	12,5559	177,2996
INTERLAG345	345	0,5826	6,3551	0,1704	27,1984
MOGI-F 230	230	0,1929	31,4861	34,7796	465,3825
UTE CCBS 230	230	0,1428	15,9134	0,3961	23,0612
SAO JOSE230	230	0,1220	10,3986	5,6143	60,1738
C.CLORO 230	230	0,4882	32,9382	3,6074	62,6759
ANGRA-FU138	138	8,2365	52,1215	6,4094	48,1851
VREDONDA138	138	1,7179	9,5407	0,2522	4,8817
ITAJUBA3-138	138	9,4931	76,6369	35,4352	100,3200
BAIXADA 138	138	10,5283	55,3819	57,0120	161,4265
BAIXADA 88	88	0,3235	3,8699	0,5440	5,7349

Tabela 4-12– Dados das impedâncias de transferência

Barra De	Barra Para	R0(Ω)	X0(Ω)	R1(Ω)	X1(Ω)
P.CALDAS500	ARARAQ. 500	8309,750	18517,250	42,465	521,200
P.CALDAS500	ARARAQ2 500	2576,500	6803,000	66,408	860,725
CAMPINAS345	GUARULH.345B	29,705	97,365	2,733	28,803
CAMPINAS345	SANGELO 345	2060,442	4398,926	61,448	418,706
CAMPINAS345	INTERLAG345	21536,741	27374,917	112,993	780,459
GUARULH.345B	SANGELO 345	11484,127	15407,191	24,837	407,042
GUARULH.345B	NORDESTE345	12,688	49,517	1,189	11,742
GUARULH.345B	INTERLAG345	61,225	105,913	0,427	7,874
MOGI-F 230	MOGI 230	0,522	7,101	0,317	1,640
MOGI AUX1	MOGI AUX2	-0,220	4,368	-0,875	33,000
MOGI AUX1	NORDESTE345	39,337	154,697	3,603	44,415
MOGI AUX2	NORDESTE345	39,337	154,697	3,603	44,415
GRAJAU 500	Z. OESTE 500	2838,500	5835,750	43,345	340,375
ITATIBA 500	ARARAQ2 500	3612,750	8798,500	162,563	959,125
UTE CCBS 230	C.CLORO 230	2,482	9,910	0,335	2,781
SANGELO 345	SUL 345	322,320	885,296	6,111	141,568
SANGELO 345	INTERLAG345	122,215	288,564	1,691	52,644
SUL 345	INTERLAG345	74,367	182,644	2,090	17,503
ARARAQ2 500	ARARAQ. 500	372,125	-1770,000	52,218	800,250
N.IGUACU 500	S.JOSE 500	208,503	794,375	16,444	239,075
P.CALDAS500	CAMPINAS345	202,045	817,850	12,895	363,850
P.CALDAS500	GUARULH.345B	327,300	1042,225	9,283	303,825
ITATIBA 500	CAMPINAS345	164,693	692,600	12,604	146,565
ARARAQ2 500	CAMPINAS345	2127,325	5006,750	107,140	685,925
MOGI AUX1	MOGI-F 230	-2,638	7,612	-1,151	43,422
MOGI AUX2	MOGI-F 230	1,243	12,995	-1,151	43,422
NORDESTE345	MOGI-F 230	50,945	200,355	4,741	58,440
ADRIANO.345	ANGRA-FU138	181072,733	94971,833	162,910	639,498
GRAJAU 500	ADRIANO.345	919,000	1429,950	10,568	118,163
S.JOSE 500	ADRIANO.345	692,850	2887,000	70,995	432,375
Z. OESTE 500	ADRIANO.345	348,475	1310,675	18,258	298,125
N.IGUACU 500	ADRIANO.345	7,540	83,298	1,088	46,530
Z. OESTE 500	ANGRA-FU138	27539,250	34870,500	138,600	757,525
ITABERA 765	BATEIAS 525	16968,014	30613,705	54,442	478,445
S.JOSE 500	VREDONDA138	58543,250	38561,000	248,195	688,950
SAO JOSE230	VREDONDA138	117,935	470,265	117,935	470,265
N.IGUACU 500	VREDONDA138	2846,500	3703,500	44,135	225,110
ITATIBA 500	SANGELO 345	2523,250	7839,000	118,950	972,925
INTERLAG345	UTE CCBS 230	73,236	344,565	15,716	102,884
TAUBATE 440	SANGELO 345	667,359	1478,852	15,458	275,357
SANGELO 345	BAIXADA 138	1313,441	2655,329	46,702	237,586

Tabela 4-13– Dados das impedâncias de transferência (continuação)

Barra De	Barra Para	R0(Ω)	X0(Ω)	R1(Ω)	X1(Ω)
ARARAQ2 500	SANGELO 345	536,600	1132,050	2,670	158,073
TAUBATE 440	SAO JOSE230	51,215	340,852	7,497	137,952
TAUBATE 440	INTERLAG345	5863,757	7441,790	24,471	376,959
ARARAQ2 500	TAUBATE 440	2842,250	5121,750	42,383	734,975
INTERLAG345	BAIXADA 88	-46,277	-1824,534	158,125	526,233
INTERLAG345	C.CLORO 230	136,438	605,861	28,746	154,054
ARARAQ2 500	INTERLAG345	10712,750	12157,000	17,062	364,275

4.3.2. Geração sintética das oscilografias no Matlab

Após a modelagem dos componentes da rede e dos diferentes cenários de falta no ATP, desenvolveu-se um sistema computacional capaz de gerar sinteticamente as oscilografias que representam cada falta considerada como relevante para um sistema de transmissão, em especial com a modelagem deste sistema.

Durante os estudos, observou-se que a variação do tipo de falta, bem como a resistência atrelada a essa falta, além da localização da mesma, o ângulo de incidência e o ponto de operação do sistema são os fatores mais relevantes no que tange ao diagnóstico de um evento.

Neste trabalho considerou-se a os parâmetros listados abaixo variando conforme descrito nos tópicos a seguir.

4.3.2.1. Tipo de falta

Todos os tipos de falta possíveis foram simulados, são eles:

- 1) Fase A para Terra (A-T);
- 2) Fase B para Terra (B-T);
- 3) Fase C para Terra (C-T);
- 4) Entre Fase A e B (A-B);
- 5) Entre Fase A e C (A-C);
- 6) Entre Fase B e C (B-C);
- 7) Trifásico sem Terra (A-B-C);
- 8) Entre Fase A e B e Terra (A-B-T);

- 9) Entre Fase A e C e Terra (A-C-T);
- 10) Entre Fase B e C e Terra (B-C-T);
- 11) Trifásico com Terra (A-B-C-T).

4.3.2.2. Localização da falta

As faltas foram simuladas dentro e fora da linha de transmissão em estudo, conforme mostrado abaixo. A referência para determinação da distância é a subestação de Cachoeira Paulista 500 kV.

- 1) Interna à LT- 0 km, no terminal da LT Tijuco Preto - Cachoeira Paulista C2 500 kV próximo à SE Cachoeira Paulista – 500 kV.
- 2) Interna à LT – 10,05 km.
- 3) Interna à LT – 20,11 km.
- 4) Interna à LT – 30,17 km.
- 5) Interna à LT – 40,22 km.
- 6) Interna à LT – 50,28 km.
- 7) Interna à LT – 60,33 km.
- 8) Interna à LT – 70,39 km.
- 9) Interna à LT – 80,44 km.
- 10) Interna à LT – 90,50 km.
- 11) Interna à LT – 100,56 km.
- 12) Interna à LT – 110,61 km.
- 13) Interna à LT – 120,67 km.
- 14) Interna à LT – 130,72 km.
- 15) Interna à LT – 140,78 km.
- 16) Interna à LT – 150,83 km.
- 17) Interna à LT – 160,89 km.
- 18) Interna à LT – 170,94 km.
- 19) Interna à LT - 181,00 km, no terminal da LT Tijuco Preto - Cachoeira Paulista C2 500 kV próximo à SE Tijuco Preto – 500 kV.
- 20) Externa à LT – No terminal da LT Tijuco Preto - Cachoeira Paulista C1 500 kV próximo à SE Cachoeira Paulista – 500 kV.
- 21) Externa à LT – No meio da LT Tijuco Preto - Cachoeira Paulista C1 500 kV

- 22) Externa à LT – No terminal da LT Tijuco Preto - Cachoeira Paulista C1 500 kV próximo à SE Tijuco Preto – 500 kV.
- 23) Externa à LT – No terminal da SE Taubaté – 500 kV
- 24) Externa à LT – No terminal da SE Araraquara 2 – 500 kV.
- 25) Externa à LT – No terminal da SE Tijuco Preto - 765 kV.
- 26) Externa à LT – No terminal da SE Itajubá – 500 kV.
- 27) Externa à LT – No terminal da SE Campinas – 500 kV.
- 28) Externa à LT – No terminal da SE Ibiúna – 500 kV.
- 29) Externa à LT – No terminal da SE Angra – 500 kV.
- 30) Externa à LT – No terminal da SE Resende – 500 kV.
- 31) Externa à LT – No terminal da SE Cachoeira Paulista 138 kV.
- 32) Externa à LT – No terminal da SE Baixada Fluminense – 500 kV.
- 33) Externa à LT – No terminal da SE Adrianópolis – 500 kV.

4.3.2.3. Resistência de falta

Os valores adotados de resistência de falta para a terra são:

- 1) 0 Ω ;
- 2) 1 Ω ;
- 3) 5 Ω ;
- 4) 10 Ω ;
- 5) 20 Ω .

As resistências entre fases foram ajustadas para um valor próximo de zero, 1e-3.

4.3.2.4. Ângulo de incidência da falta (fase da tensão no momento da falta)

Esta variável representa o tempo em segundos do instante que ocorre a falta no sistema. Os valores utilizados neste trabalho foram:

- 1) 0,06667 s;
- 2) 0,06875 s;
- 3) 0,07083 s;

4) 0,07292 s;

5) 0,07500 s;

4.3.2.5. Ponto de operação do sistema

Para as simulações, adotou-se apenas um ponto de operação do sistema que corresponde à carga pesada.

A combinação das variáveis descritas nos tópicos anteriores remete à vasta gama de simulações geradas. Ao todo foram geradas 9.075 combinações possíveis de oscilografia de falta, o que se explica da seguinte forma:

Número de casos de falta gerados = 11 tipos de falta x 33 localizações x 5 resistências de falta x 5 instantes de falta x 1 ponto de operação = 9.075 casos diferentes de falta gerados.

No entanto, a fim de agilizar as simulações do detector, nem todos os casos gerados foram testados no sistema de detecção de falta. Optou-se por testar 1.584 casos de falta para cada tipo de monitoração. Essa escolha originou-se da combinação das variáveis da seguinte forma:

Número de casos de falta simulados = 11 tipos de falta x 16 localizações (1 a 31 com passo = 2) x 3 resistências de falta (1 a 5 com passo = 2) x 3 instantes de falta (1 a 5 com passo = 2) x 1 ponto de operação = 1.584 casos diferentes de falta analisados pelo detector.

Nas tabelas Tabela 4-14 a Tabela 4-18 estão identificadas as faltas geradas. No próximo capítulo elas serão representadas pelos índices mostrados abaixo. Tanto a resistência, quanto o instante de falta possuem valores numéricos, então o índice representa o próprio valor da variável, o que não é possível para a representação do tipo de falta, da localização da falta e do ponto de operação do sistema, portanto foram utilizados os índices mostrados nas tabelas referidas anteriormente.

O monitoramento das variáveis se deu através de cinco formas diferentes, as quais estão descritas abaixo.

- 1) Tensão monofásica - tensão na fase A.
- 2) Tensões trifásicas – tensão nas fases A, B e C.
- 3) Corrente Monofásica – corrente na fase A.

- 4) Correntes trifásicas – corrente nas fases A, B e C.
- 5) Tensões e correntes trifásicas - tensão nas fases A, B e C e corrente nas fases A, B e C.

Tabela 4-14 – Representação dos tipos de falta gerados

Índice	Tipo de Falta
1	A-T
2	B-T
3	C-T
4	AB
5	AC
6	BC
7	ABC
8	AB-T
9	AC-T
10	BC-T
11	ABC-T

Tabela 4-15 - Representação da localização da falta

Índice	Localização
0	Interna - 0 km
1	Interna - 10.05 km
2	Interna - 20.11 km
3	Interna - 30.17 km
4	Interna - 40.22 km
5	Interna - 50.28 km
6	Interna - 60.33 km
7	Interna - 70.39 km
8	Interna - 80.44 km
9	Interna - 90.50 km
10	Interna - 100.56 km
11	Interna - 110.61 km
12	Interna - 120.67 km
13	Interna - 130.72 km
14	Interna - 140.78 km
15	Interna - 150.83 km
16	Interna - 160.89 km

17	Interna - 170.94 km
18	Interna - 181.00 km
19	Externa - LT TP-CP 500 kV - C1 (Cachoeira Paulista 500 kV)
20	Externa - LT TP-CP 500 kV - C1 (50% da LT)
21	Externa - LT TP-CP 500 kV - C1 (Tijuco Preto 500 kV)
22	Externa - TA500 (Taubaté 500 kV)
23	Externa - A2500 (Araraquara 2 500 kV)
24	Externa - TP765 (Tijuco Preto 765 kV)
25	Externa - IT500 (Itajubá 500 kV)
26	Externa - CA500 (Campinas 500 kV)
27	Externa - IB500 (Ibiuna 500 kV)
28	Externa - AN500 (Angra 500 kV)
29	Externa - RE500 (Resende 500 kV)
30	Externa - CP138 (Cachoeira Paulista 138 kV)
31	Externa - BF500 (Baixada Fluminense 500 kV)
32	Externa - AD500 (Adrianópolis 500 kV)

Tabela 4-16 - Representação da resistência de falta

Resistência (Ω)
0
1
5
10
20

Tabela 4-17 - Representação do instante de falta

Instante (s)
0.06670
0.06880
0.07080
0.07290
0.07500

Tabela 4-18 - Representação do ponto de operação do sistema

Índice	Ponto de Operação
1	Carga Pesada

4.3.3. Eventos de qualidade de energia no Matlab

Devido à ausência de dados reais do sistema de distribuição, utilizou-se da formulação matemática desenvolvida em [37] para gerar as oscilografias que representam a ocorrência de evento no sistema.

Na Tabela 4-19, tem-se as equações e os parâmetros necessários para simulação de cada distúrbio.

Tabela 4-19– Modelagem dos distúrbios (adaptado de [37])

Evento	Parâmetros	Equação
Senóide Pura	N/A	$v(t) = sen(wt)$
Swell	$0.1 \leq \alpha \leq 0.8, \quad T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$	$v(t) = A(1 + \alpha(u(t_2) - u(t_1)))sen(wt)$
Sag	$0.1 \leq \alpha \leq 0.9, \quad T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$	$v(t) = A(1 - \alpha(u(t_2) - u(t_1)))sen(wt)$
Harmônicos	$0.05 \leq \alpha_3, \alpha_5, \alpha_7 \leq 0.15, \quad \alpha_1 = 1$	$v(t) = A(\alpha_1 sen(wt) + \alpha_3 sen(3wt) + \alpha_5 sen(5wt) + \alpha_7 sen(7wt))$
Outage	$0.9 \leq \alpha \leq 1, \quad T \leq t_2 - t_1 \leq 9T$	$v(t) = A(1 - \alpha(u(t_2) - u(t_1)))$
Swell com Harmônicos	$0.1 \leq \alpha \leq 0.8, \quad T \leq t_2 - t_1 \leq 9T,$ $0.05 \leq \alpha_3, \alpha_5, \alpha_7 \leq 0.15, \quad \alpha_1 = 1$	$v(t) = A(1 + \alpha(u(t_2) - u(t_1)))(sen(wt) + \alpha_3 sen(3wt) + \alpha_5 sen(5wt) + \alpha_7 sen(7wt))$
Sag com Harmônicos	$0.1 \leq \alpha \leq 0.9, \quad T \leq t_2 - t_1 \leq 9T,$ $0.05 \leq \alpha_3, \alpha_5, \alpha_7 \leq 0.15, \quad \alpha_1 = 1$	$v(t) = A(1 - \alpha(u(t_2) - u(t_1)))(sen(wt) + \alpha_3 sen(3wt) + \alpha_5 sen(5wt) + \alpha_7 sen(7wt))$

A frequência de amostragem utilizada nas simulações foi de 100 [kHz], considerando a frequência da rede igual 60 [Hz] (frequência nominal da rede elétrica no Brasil), e o tempo de simulação foi de 500 [MS]. Em todas oscilografias, adotou-se amplitude igual a 1 p.u..

Os eventos simulados neste trabalho e os parâmetros utilizados para gerar as oscilografias contendo os eventos estão descritos nos tópicos a seguir.

4.3.3.1. Sag

Para representação do afundamento de tensão, Sag, utilizou-se como parâmetros $\alpha = 0.8$, $t_1 = 0.25$ s, $t_2 = 0.28$ s.

4.3.3.2. Swell

A modelagem da sobretensão, Swell, utilizou $\alpha = 0.7$, $t_1 = 0.25$ s, $t_2 = 0.28$ s.

4.3.3.3. Sag com Harmônicos

Optou-se por representar uma oscilografia contendo harmônicos até sétima ordem para representar uma rede elétrica de forma mais realística. Neste oscilografia com harmônicos, aplicou-se um afundamento de tensão.

Os parâmetros utilizados para modelagem deste distúrbio foi $\alpha = 0.8$; $\alpha_1 = 1$; $\alpha_3 = 0.06$; $\alpha_5 = 0.10$; $\alpha_7 = 0.14$; $t_1 = 0.25$ s e $t_2 = 0.28$ s.

4.3.3.4. Swell com Harmônicos

Da mesma forma, gerou-se uma oscilografia de tensões trifásicas com sobretensão no trecho entre $t_1 = 0.25$ s e $t_2 = 0.28$ s. Além disso, $\alpha = 0.7$; $\alpha_1 = 1$; $\alpha_3 = 0.09$; $\alpha_5 = 0.12$; $\alpha_7 = 0.15$.

Por não se obter os valores reais de um sistema de distribuição, as oscilografias de corrente não foram geradas. Desta forma, o monitoramento das variáveis se deu através de duas formas distintas, as quais estão descritas abaixo.

- 1) Tensão monofásica - tensão na fase A.
- 2) Tensões trifásicas – tensão nas fases A, B e C.

4.4. PARAMETRIZAÇÕES DOS ALGORITMOS UTILIZADOS

Para criação do detector de eventos, optou-se por utilizar três metodologias distintas com o intuito de avaliar o melhor desempenho. Deste modo, o detector foi criado com a opção de escolha do método variando entre:

- 1) Rede neural com inferência Bayesiana aplicada ao desenvolvimento de MPLs;
- 2) Operador de Energia de Teager;
- 3) Filtro de Kalman.

O método baseado em inferência Bayesiana aplicada ao desenvolvimento de MPLs se mostrou uma técnica promissora em [38] gerando resultados satisfatórios para previsão de carga. As técnicas bayesianas mostraram aplicabilidade e eficiência em termos de capacidade de generalização no desenvolvimento de MLPs para previsão de carga. Fazendo uso de todos os níveis hierárquicos de inferência, desde a estimação dos parâmetros do modelo até a escolha da estrutura mais provável à luz dos dados, passando pela estimativa dos hiperparâmetros, este método permite selecionar, de forma automática e acoplada, tanto as entradas mais relevantes para o cálculo da saída, quanto o próprio modelo. [38]

A segmentação automática de evento em sistemas de potência através do método baseado no Operador de Teager se mostrou uma técnica simples e eficaz em [32], com baixo tempo de processamento e alta precisão. Além disso, o fato de não haver parâmetros a serem definidos previamente faz com que a técnica se torne atrativa, uma vez que nessa abordagem apenas as amostras atual, anterior e posterior são necessárias para o cálculo utilizado na detecção de eventos.

A técnica estatística do filtro de Kalman, apesar de simples é bastante difundida em sistemas de potência, inclusive existem linhas de pesquisa que estudam aplicações na área de diagnóstico em linhas de transmissão.

4.4.1. Parâmetros utilizados na Rede Neural

A rede neural utilizada neste trabalho tomou por base um modelo *feedforward* com método de automatização do processo de especificação e treinamento baseada em Inferência Bayesiana aplicada ao MLP. Por se tratar de um método autônomo, poucos parâmetros necessitam ser definidos, são eles o número mínimo de neurônios, o nível de significância do teste de hipótese da teoria do caos e o nível de significância do detector.

Neste trabalho, definiu-se o número mínimo de neurônios na camada escondida variando entre $m_{\min} = 1$ e $m_{\max} = 25$ para o problema em sistema de transmissão e $m_{\min} = 1$ e $m_{\max} = 10$ para o problema de distribuição. Apesar de escolhido de forma heurística, este

número máximo foi definido tendo em mente o número de padrões disponíveis para treinamento e a quantidade de parâmetros a serem estimados. O nível de significância do teste de hipótese da teoria do caos foi considerado igual a 95%. Já o nível de confiança do detector foi considerado igual a 99%.

4.4.2. Parâmetros do Operador de Energia de Teager

Como dito anteriormente, o método de detecção baseado no Operador de Energia de Teager se torna uma técnica de fácil implementação, visto que sua formulação matemática apenas depende de amostras atual, anterior e posterior para realizar o cálculo utilizado na detecção de eventos. Sendo assim, não há parâmetros a definir neste modelo.

4.4.3. Parâmetros do Filtro de Kalman

Neste modelo alguns parâmetros necessitam ser especificados para que seja possível realizar a previsão através do Filtro de Kalman, conforme aborda o item 3.2 deste documento.

Pela formulação matemática do Filtro de Kalman descrito pelas equações (3-2) e (3-3), observa-se a necessidade de definição da matriz de transição entre estados, A , além da matriz de observação, C , a matriz de covariância do ruído do modelo, Q_w , e a matriz de covariância do ruído da medição, Q_v .

Adotou-se a existência de harmônicos apenas na frequência fundamental, desse modo a matriz de transição entre estados reduz-se da equação (3-10) para $A = \begin{bmatrix} \cos(w_1) & -\text{sen}(w_1) \\ \text{sen}(w_1) & \cos(w_1) \end{bmatrix}$

onde $w_1 = 2\pi f_0 / f_s$, com $f_s = \frac{1}{T_s} = 1.10^5 \text{ Hz}$ respondendo pela frequência de amostragem escolhida e f_0 a frequência fundamental, 60 Hz. Deste modo, $w_1 = 0.03769 \text{ rad/s}$.

Portanto, a matriz de transição entre estados se resume a $A = \begin{bmatrix} 0.99929 & -0.03769 \\ 0.03769 & 0.99929 \end{bmatrix}$ e se mantém constante até o fim da simulação.

Assumiu-se que o sinal estimado não contém erro associado, desse modo, a covariância do ruído do sinal, Q_w , foi considerada igual a 0.

A matriz de covariância do ruído da medida foi considerada equivalente à variância do sinal observado. Portanto $Q_v = \text{var}(z)$.

Por fim, a matriz de observação que relaciona os estados, C , a partir da equação (3-11), foi definida como um vetor de comprimento 2 assumindo os valores $C = [1 \ 0]$.

5. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentadas algumas oscilografias de eventos simulados no MATLAB e que serviram como base de entrada para o detector. Em seguida serão apresentados os resultados obtidos a partir das simulações tanto no sistema de transmissão quanto no sistema de distribuição. Por fim, a análise dos resultados.

5.1. OSCILOGRAFIAS GERADAS NAS SIMULAÇÕES

5.1.1. Sistema de transmissão

Neste tópico, algumas das oscilografias geradas sinteticamente para representar faltas na linha de transmissão que liga as subestações de Tijuco Preto e Cachoeira Paulista através do circuito 2, serão apresentadas. Devido à alta quantidade de oscilografias geradas no programa MATLAB®, somente algumas serão exibidas.

O monitoramento ocorreu através da tensão na fase A ou das tensões trifásicas ou da corrente na fase A ou das correntes trifásicas ou das correntes e tensões trifásicas ao mesmo tempo.

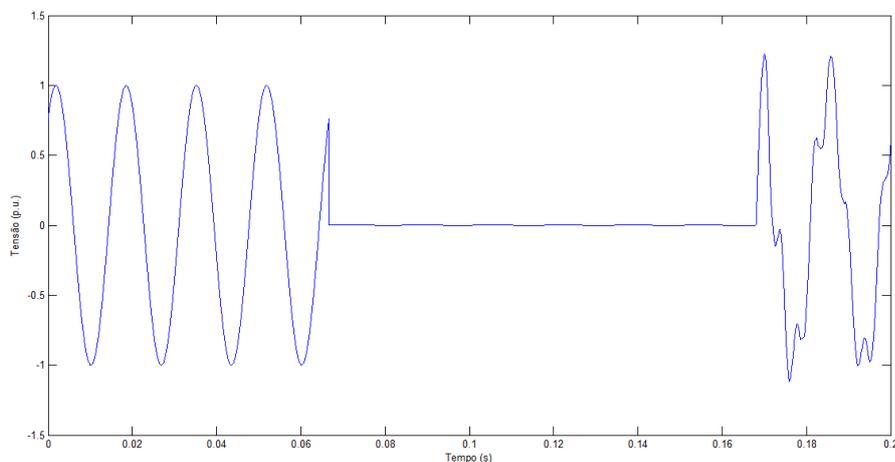


Figura 5.1 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada na fase A

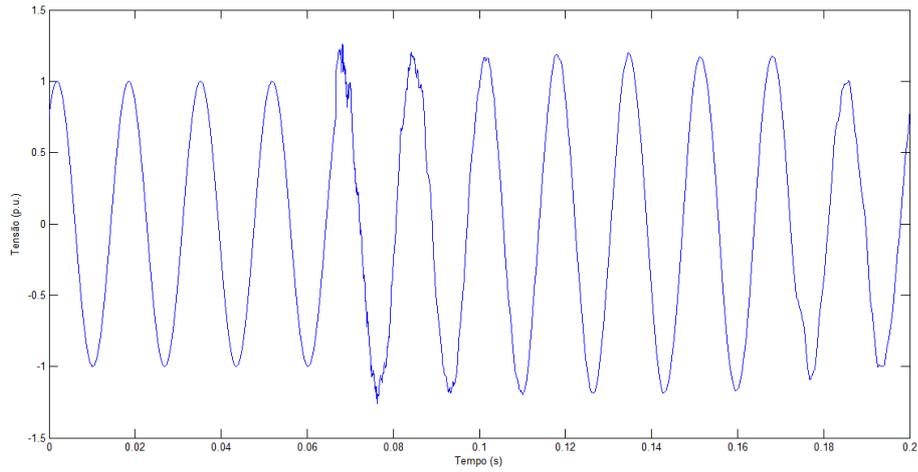


Figura 5.2 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada na fase B

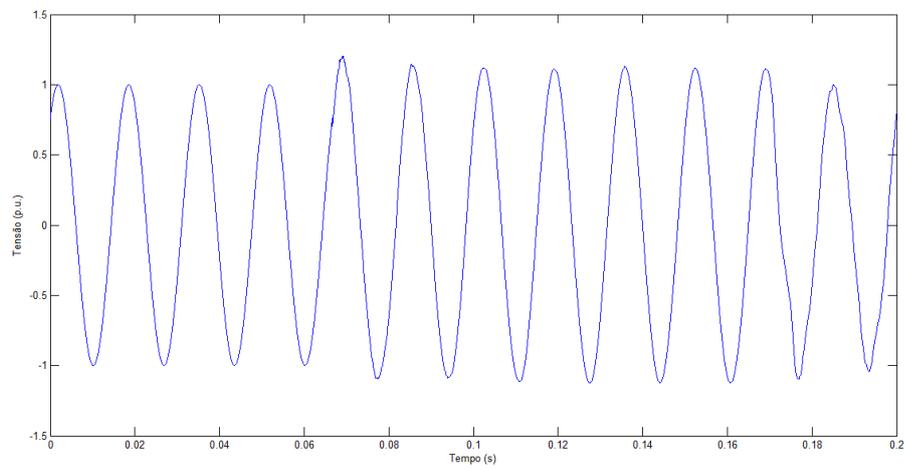


Figura 5.3 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada na fase C

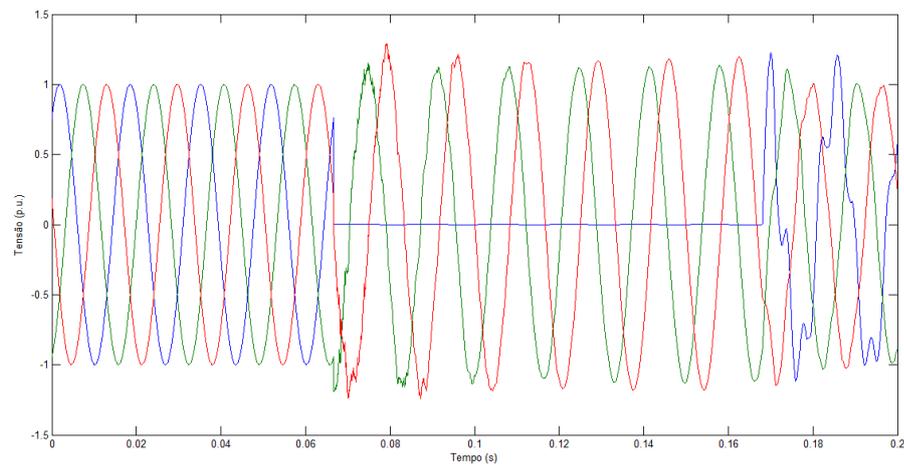


Figura 5.4 - Oscilografia de tensões trifásicas com falta aplicada na fase A

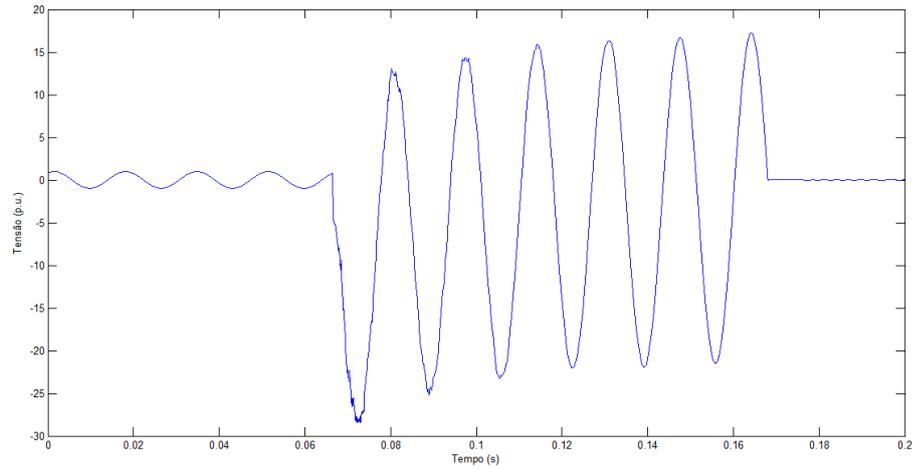


Figura 5.5 - Oscilografia de corrente monofásica com falta aplicada na fase A

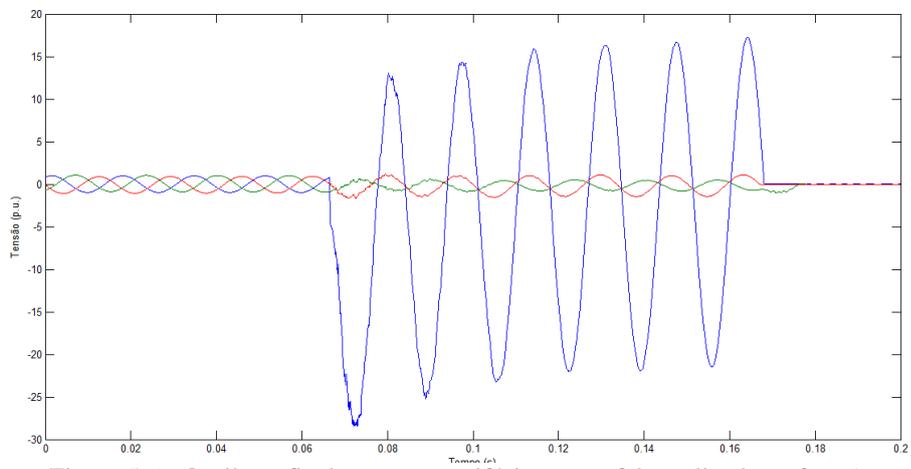


Figura 5.6 - Oscilografia de correntes trifásicas com falta aplicada na fase A

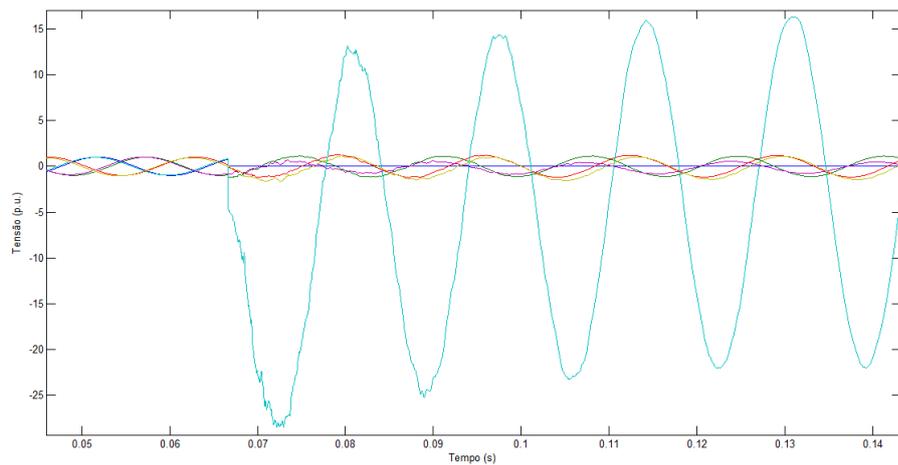


Figura 5.7 - Oscilografia de tensões e correntes trifásicas com falta aplicada na fase A

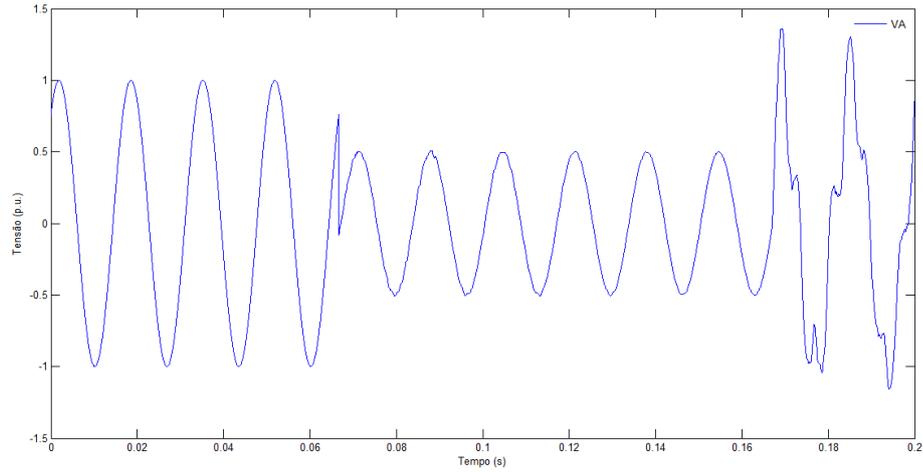


Figura 5.8 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada entre as fases A e B

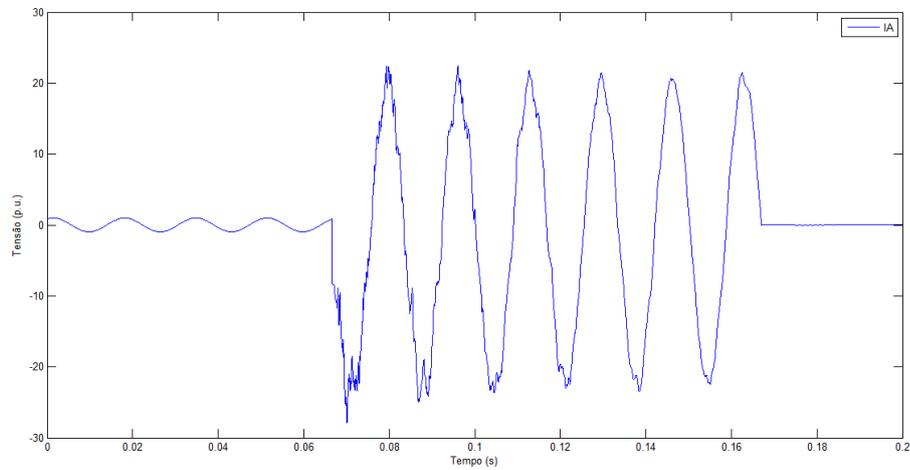


Figura 5.9 - Oscilografia de corrente monofásica com falta aplicada entre as fases A e B

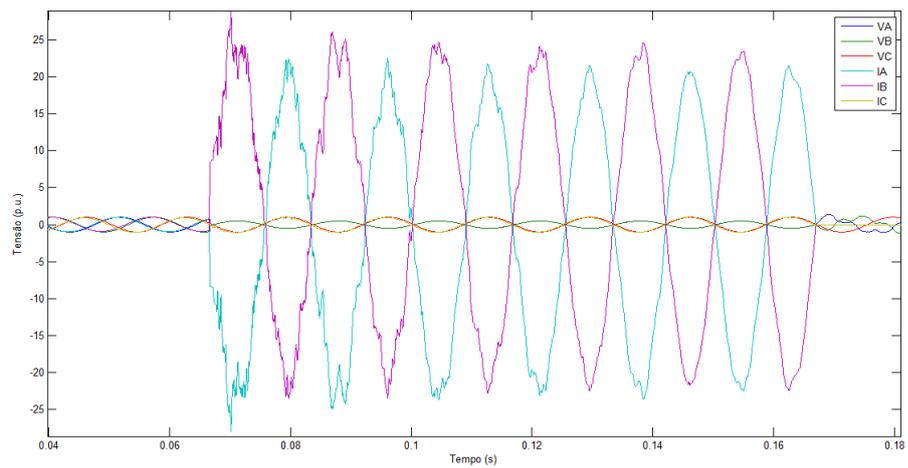


Figura 5.10 - Oscilografia de tensões e correntes trifásicas com falta aplicada entre as fases A e B

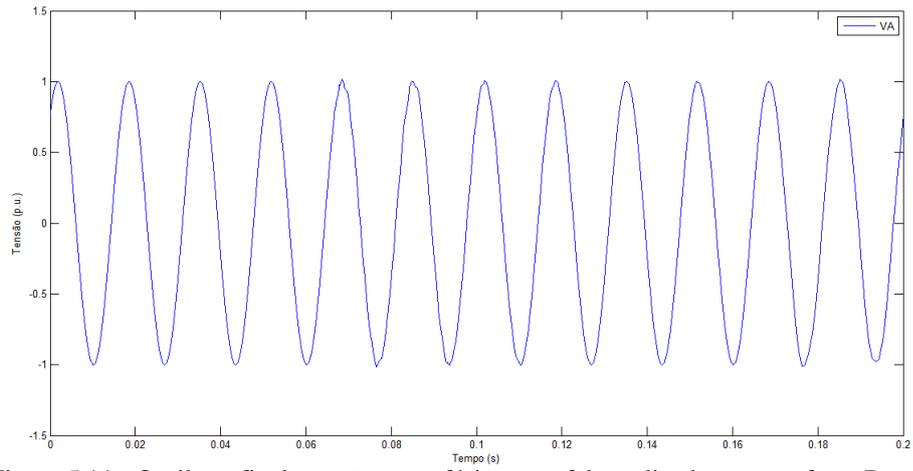


Figura 5.11 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada entre as fases B e C

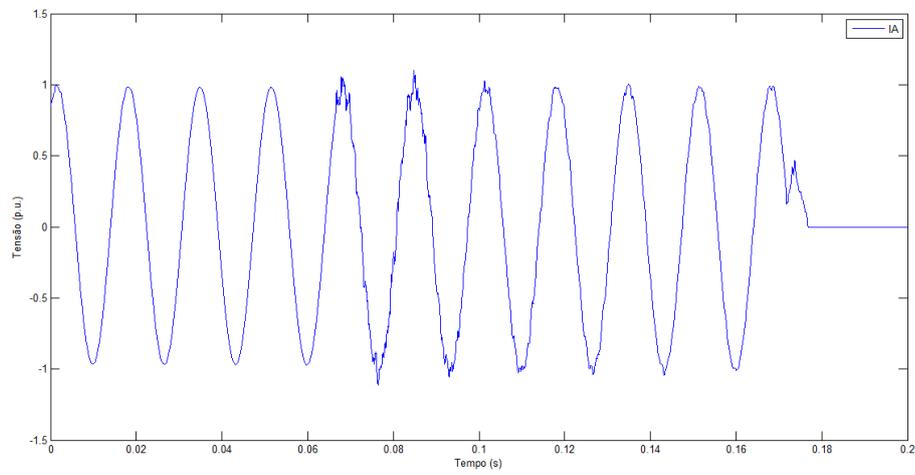


Figura 5.12 - Oscilografia de corrente monofásica com falta aplicada entre as fases B e C

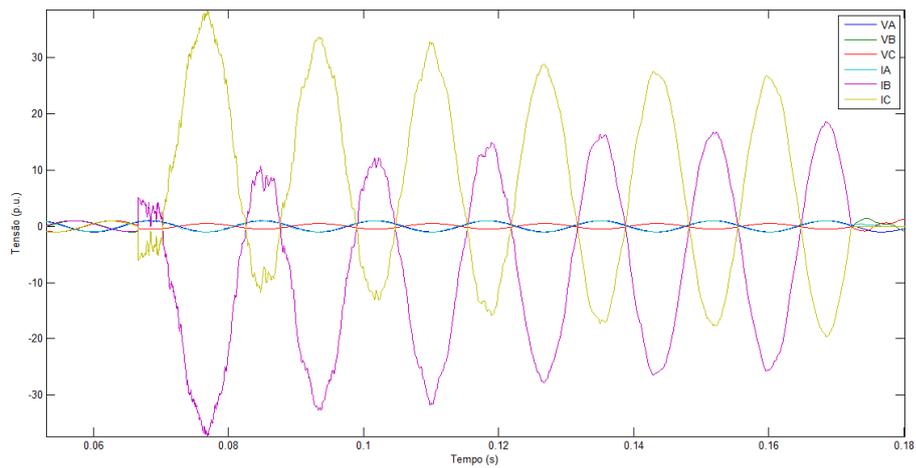


Figura 5.13 - Oscilografia de correntes e tensões trifásicas com falta aplicada entre as fases B e C

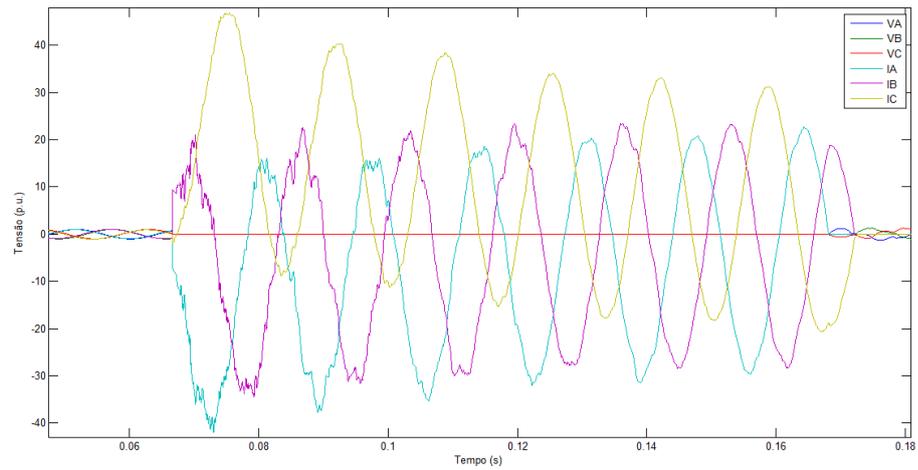


Figura 5.14 - Oscilografia de correntes e tensões trifásicas com falta aplicada entre as fases A, B e C

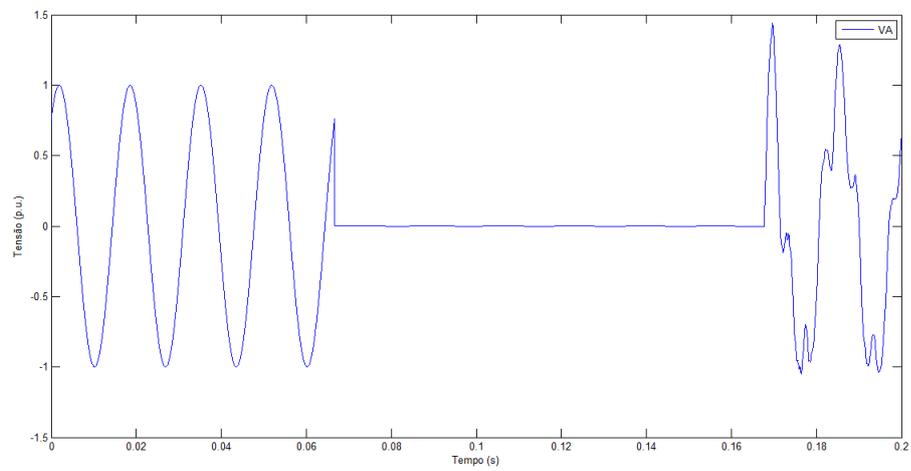


Figura 5.15 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada entre as fases A e B e Terra

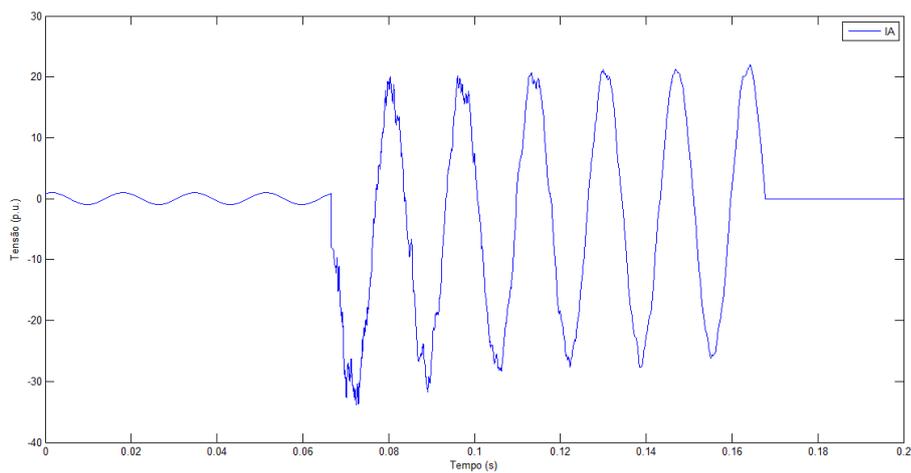


Figura 5.16 - Oscilografia de corrente monofásica com falta aplicada entre as fases A e B e Terra

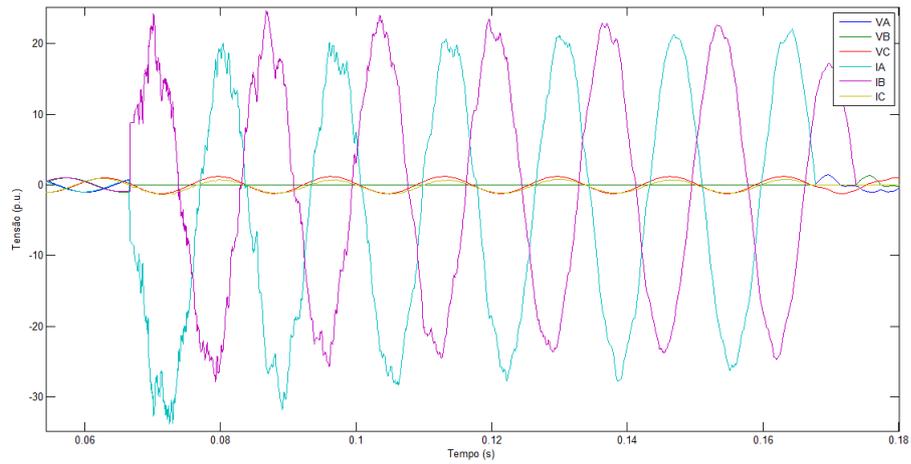


Figura 5.17 - Oscilografia de correntes e tensões trifásicas com falta aplicada entre as fases A e B e Terra

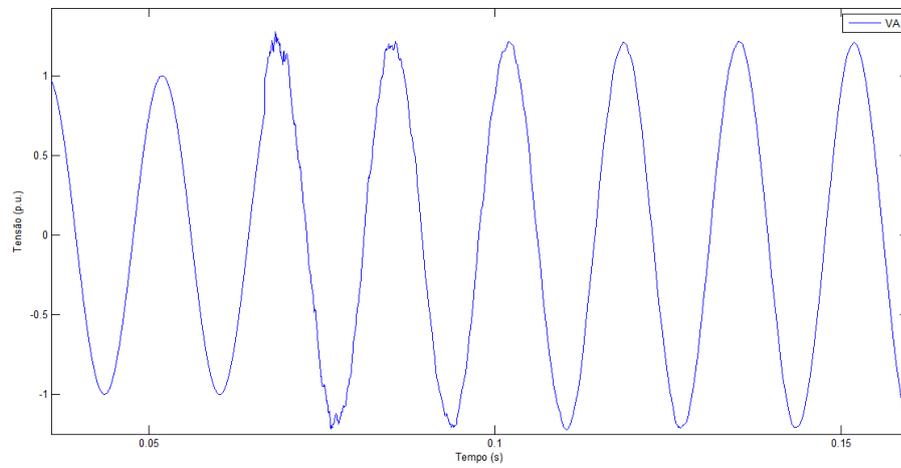


Figura 5.18 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada entre as fases B e C e Terra

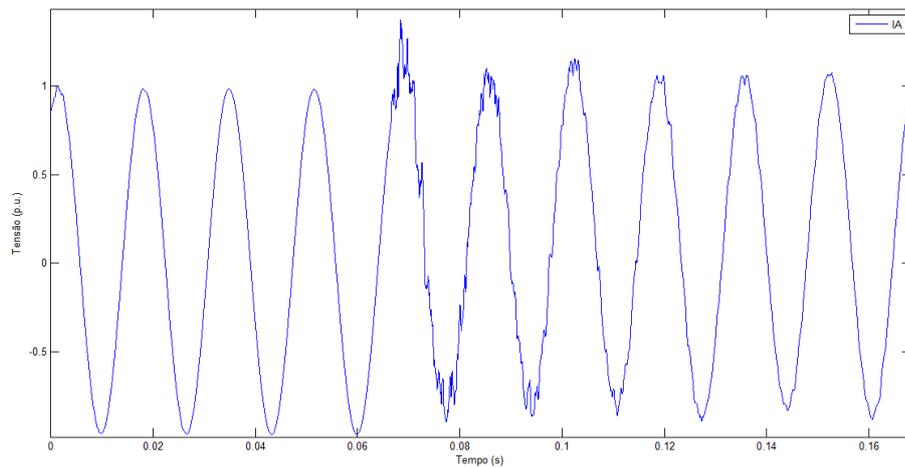


Figura 5.19 - Oscilografia de corrente monofásica com falta aplicada entre as fases B e C e Terra

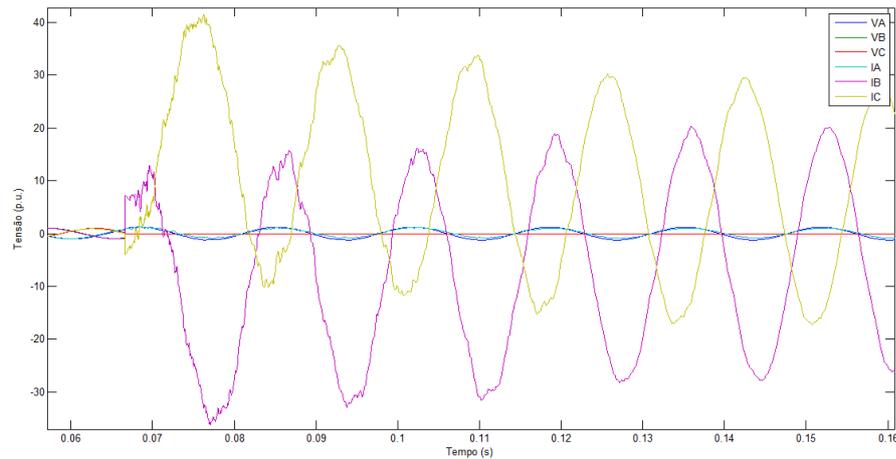


Figura 5.20 - Oscilografia de tensões e correntes trifásicas com falta aplicada entre as fases B e C e Terra

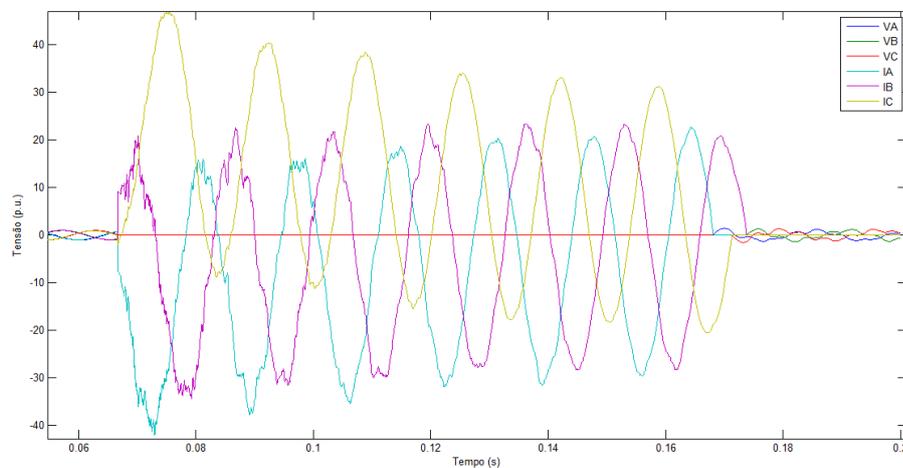


Figura 5.21 - Oscilografia de tensões e correntes trifásicas com falta aplicada entre as fases A, B e C e Terra

As oscilografias mostradas nas figuras Figura 5.1 a Figura 5.21 ilustram a ocorrência de faltas distintas internas à linha de transmissão em estudo próximo à subestação onde estão sendo monitoradas as tensões e correntes.

Com base numa análise preliminar das oscilografias apresentadas, é possível concluir que a melhor escolha para monitoramento seria de grandezas trifásicas - tensões trifásicas ou correntes trifásicas e/ou tensões e correntes trifásicas, visto que o monitoramento de variáveis monofásicas atrapalharia o desempenho do detector em se tratando de falta envolvendo uma ou mais fases não monitoradas. Pensando numa economia de tempo e dinheiro envolvido, sugere-se o monitoramento apenas das tensões ou correntes trifásicas nos terminais da LT na subestação. O monitoramento das correntes junto com as tensões se torna mais relevante quando o objetivo é a classificação do defeito. Como o foco deste trabalho é apenas a detecção do defeito, monitorar as tensões trifásicas ou as correntes trifásicas torna-se suficiente para solução do problema.

A partir de agora, serão apresentadas novas oscilografias para verificar quais variáveis realmente interferem na percepção, pelo sinal que está sendo monitorado, do ponto de ocorrência do defeito. Optou-se por aplicar uma falta trifásica à terra e monitorar apenas a tensão monofásica. A primeira análise se restringiu à variação da localização do defeito. Testou-se a aplicação do defeito em quatro pontos distintos, são eles: no terminal da LT na subestação onde o sinal está sendo monitorado; no meio da LT monitorada, no terminal oposto da LT e externo à LT. Os resultados são apresentados nas figuras a seguir.

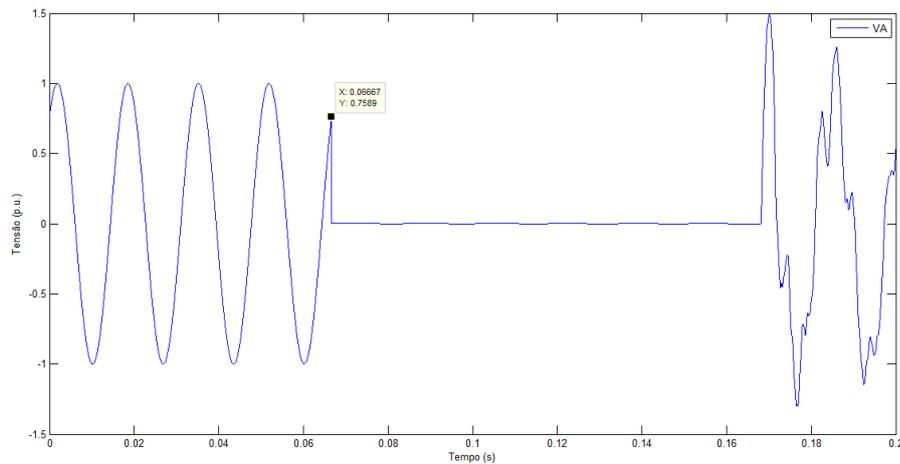


Figura 5.22 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada entre as fases A,B e C e Terra no terminal da LT monitorada. Detalhe para o instante de percepção do defeito.

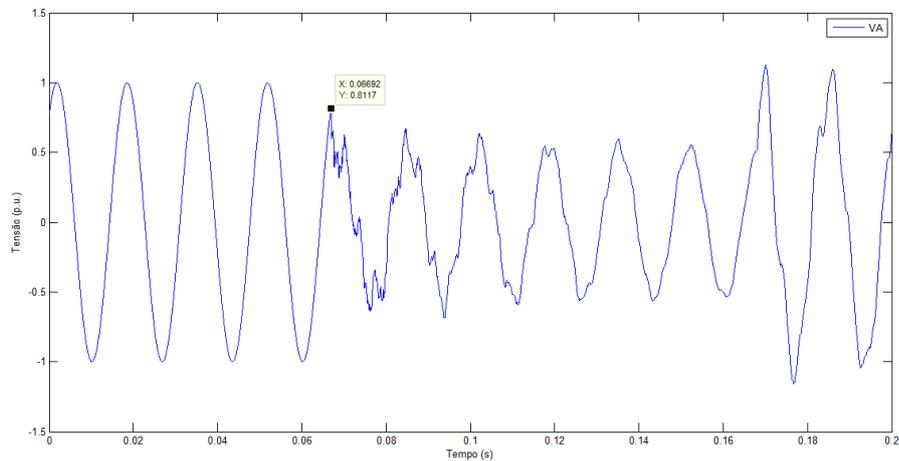


Figura 5.23 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada entre as fases A,B e C e Terra no meio da LT monitorada. Detalhe para o instante de percepção do defeito.

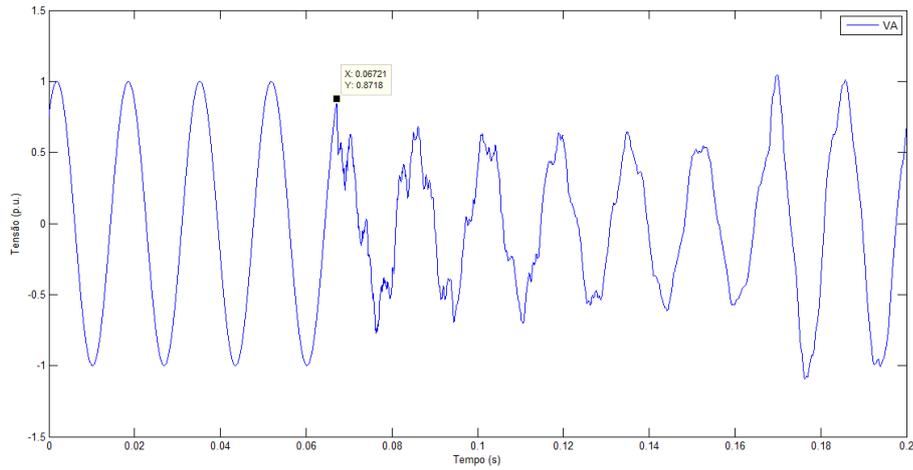


Figura 5.24 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada entre as fases A,B e C e Terra no terminal da LT monitorada. Detalhe para o instante de percepção do defeito.

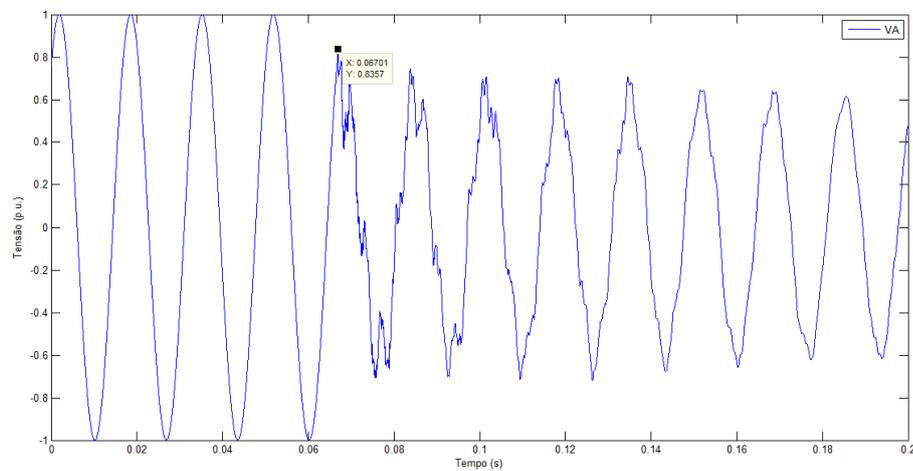


Figura 5.25 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada entre as fases A,B e C e Terra em LT externa à monitorada. Detalhe para o instante de percepção do defeito.

A segunda análise se restringiu à variação da resistência de falta. Testou-se a aplicação do falta trifásica à terra em quatro pontos distintos.

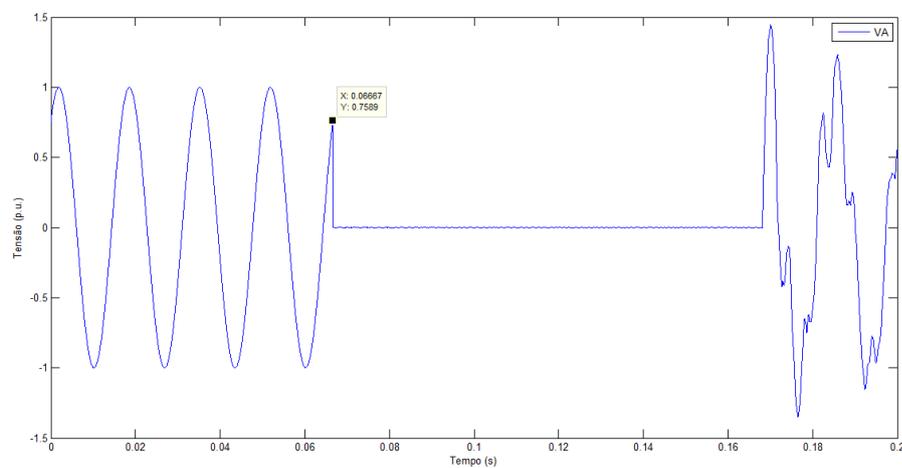


Figura 5.26 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada entre as fases A,B e C e Terra com resistência de falta = 0Ω. Detalhe para o instante de percepção do defeito.

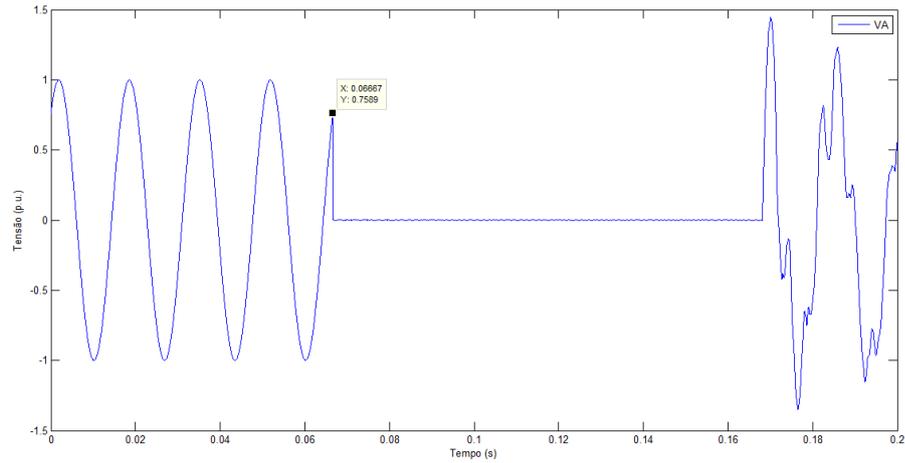


Figura 5.27 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada entre as fases A,B e C e Terra com resistência de falta = 5Ω . Detalhe para o instante de percepção do defeito.

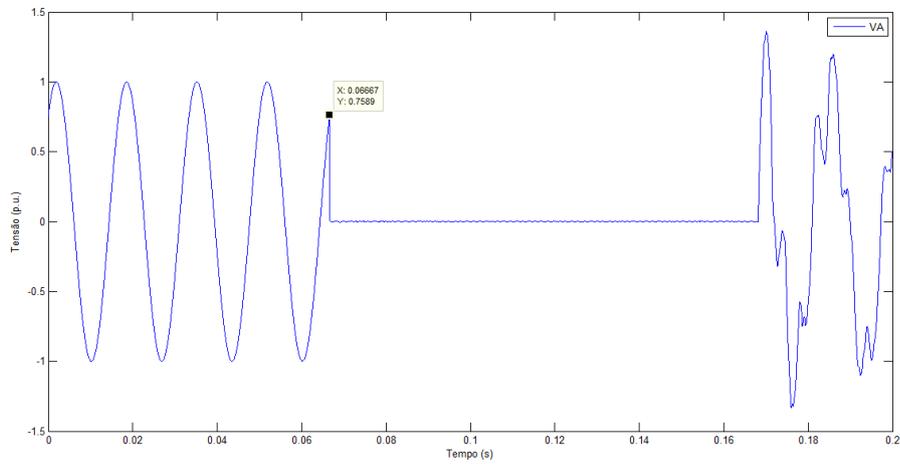


Figura 5.28 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada entre as fases A,B e C e Terra com resistência de falta = 20Ω . Detalhe para o instante de percepção do defeito.

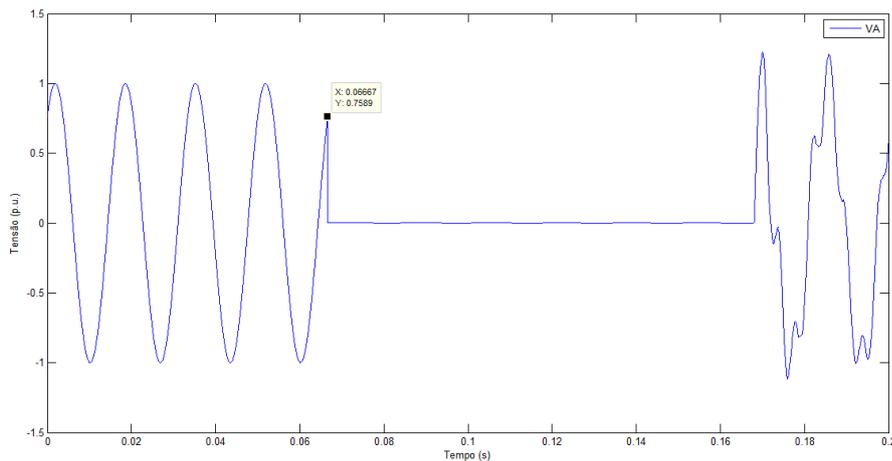


Figura 5.29 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada entre a fase A e Terra com resistência de falta = 0Ω . Detalhe para o instante de percepção do defeito

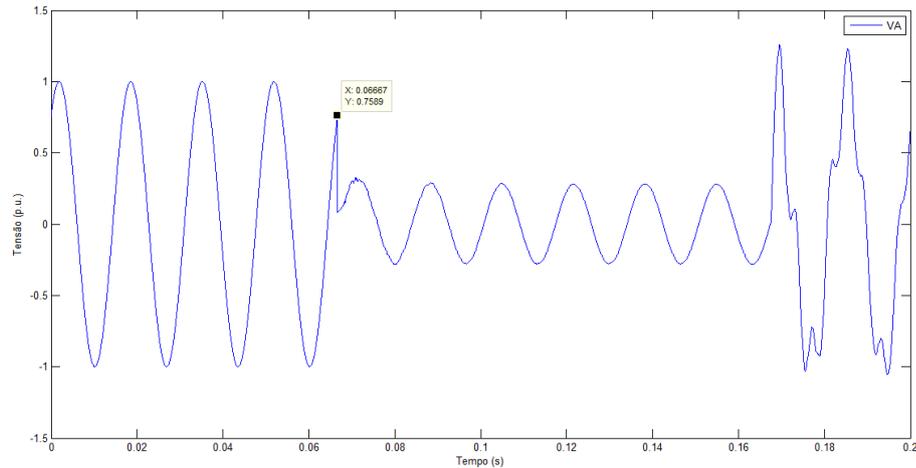


Figura 5.30 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada entre fase A e Terra com resistência de falta = 5Ω . Detalhe para o instante de percepção do defeito

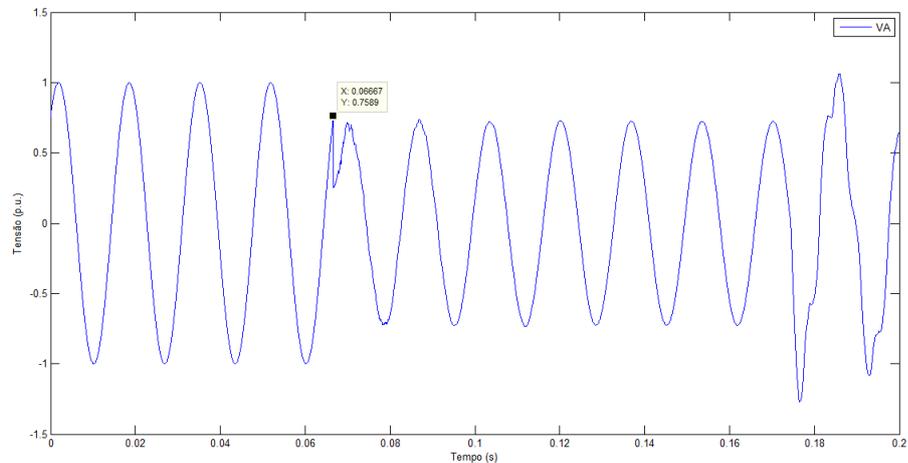


Figura 5.31 - Oscilografia de tensão monofásica com falta aplicada entre fase A e Terra com resistência de falta = 20Ω . Detalhe para o instante de percepção do defeito

A partir das análises apresentadas acima, é possível observar que o instante de detecção do defeito varia de acordo com a localização da falta, quanto mais próximo do sinal monitorado, mais rápido a sensibilidade deste sinal ao defeito. Em contrapartida, para os valores de resistência de falta adotados neste trabalho, não houve impacto na sensibilidade do instante de aplicação do defeito. A resistência de falta implica diretamente no comportamento do sinal durante o período de ocorrência do defeito.

5.1.2. Sistema de distribuição

Abaixo seguem as oscilografias de tensão geradas sinteticamente no programa MATLAB® para representação de alguns eventos de qualidade de energia. Neste trabalho foram simulados os distúrbios de afundamento de tensão nas três fases, sobretensão nas três fases, bem como o afundamento e sobretensão associados a harmônicos.

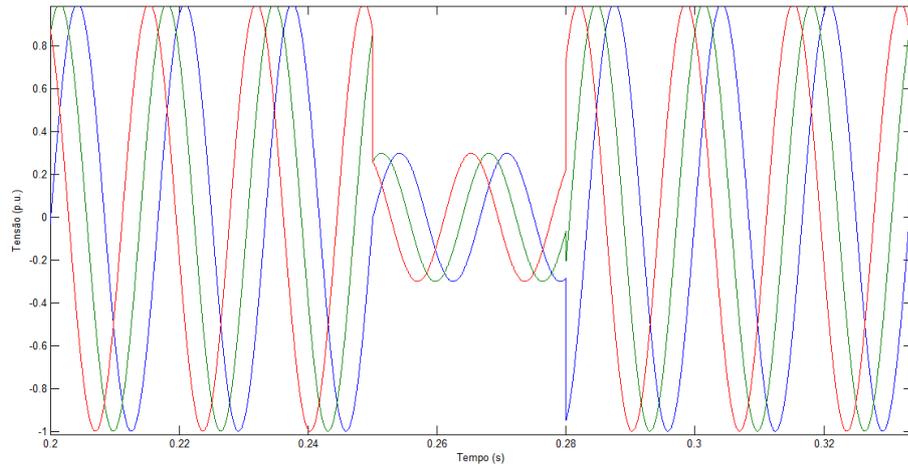


Figura 5.32 – Oscilografia de tensões trifásicas com afundamento de tensão

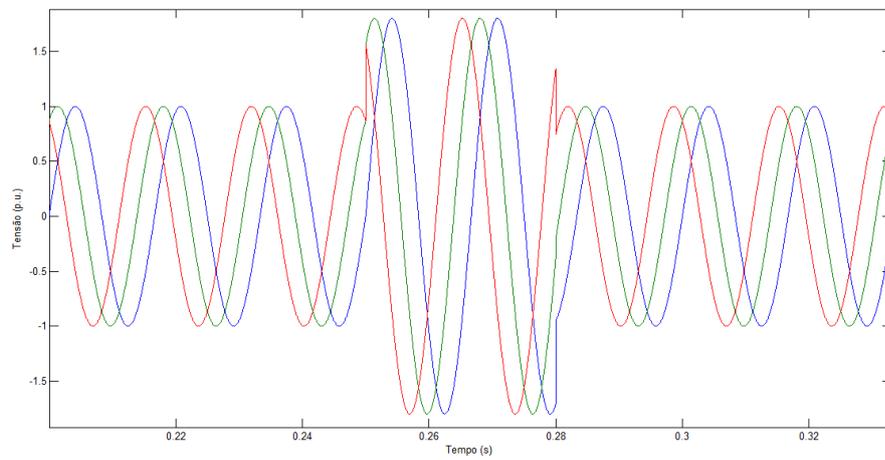


Figura 5.33 - Oscilografia de tensões trifásicas com sobretensão

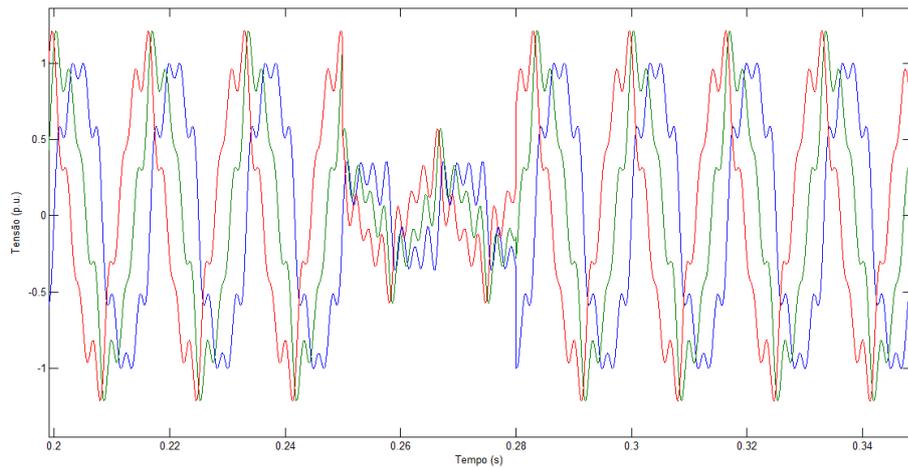


Figura 5.34 - Oscilografia de tensões trifásicas com harmônicos e afundamento de tensão

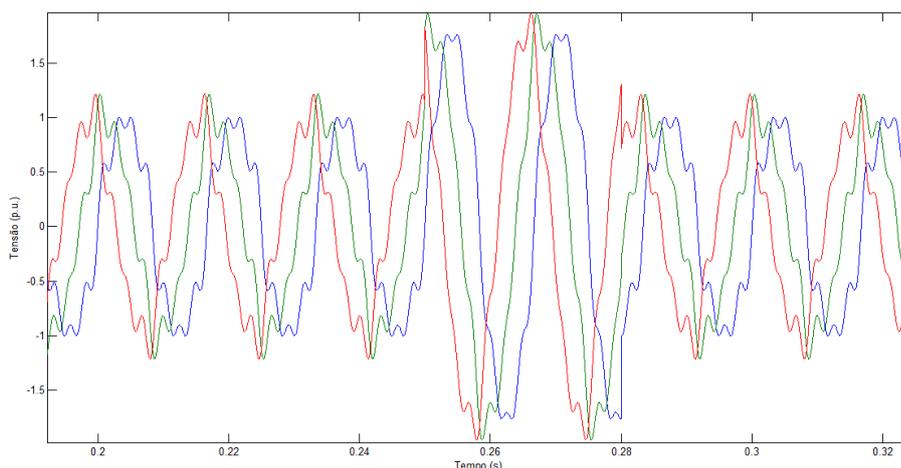


Figura 5.35 - Oscilografia de tensões trifásicas com harmônicos e sobretensão

5.2. DESCRIÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE CRÍTICA

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos pelos três detectores criados, tanto para o problema de transmissão, quanto para o problema de distribuição. A análise de desempenho dos métodos de detecção de evento será feita com base no erro médio associado a cada estimativa e o tempo de simulação computacional.

5.2.1. Detecção de evento no sistema de transmissão

Nesta etapa os detectores foram simulados variando o tipo de falta aplicado, a localização da falta, a resistência de falta e o instante de aplicação da mesma.

A premissa utilizada para medição do tempo de simulação do detector foi a simulação de apenas um evento com monitoramento de tensão monofásica ou tensões trifásicas ou corrente monofásica ou correntes trifásicas ou correntes e tensões trifásicas.

Tabela 5-1 - Desempenho dos métodos de detecção de faltas em linha de transmissão

Monitoramento	Critério	Detector			Melhor Desempenho
		Bayesiano	FK	OET	
Tensão Monofásica	Erro médio (s)	0.01897 ± 0.03304	0.00093 ± 0.00764	0.00106 ± 0.00890	FK
	Tempo Médio de Simulação (s)	10.69398	1.63618	0.57163	OET
Tensões Trifásicas	Erro médio (s)	0.00211 ± 0.01141	0.00029 ± 0.00018	0.06760 ± 0.00340	FK
	Tempo Médio de Simulação (s)	24.17046	2.52334	0.28123	OET

Corrente Monofásica	Erro médio (s)	0.00646 ± 0.02365	0.00237 ± 0.01314	0.00651 ± 0.02264	FK
	Tempo Médio de Simulação (s)	10.75117	0.86492	0.2425	OET
Correntes Trifásicas	Erro médio (s)	0.00161 ± 0.01075	0.00105 ± 0.00721	0.07081 ± 0.00340	FK
	Tempo Médio de Simulação (s)	31.32785	2.4272	0.28342	OET
Tensões e Correntes Trifásicas	Erro médio (s)	0.00110 ± 0.00839	0.00029 ± 0.00018	0.07081 ± 0.00340	FK
	Tempo Médio de Simulação (s)	31.32785	4.60018	0.29744	OET

No geral, o detector que apresentou o menor erro de sua estimação em relação ao correto instante de aplicação do evento foi o detector baseado no Filtro de Kalman. Em contrapartida, o detector mais rápido é o que se baseia na metodologia do Operador de Teager, haja vista a simplicidade do cálculo envolvido. O detector baseado em rede neural com inferência Bayesiana obteve resultados medianos em relação à sua acurácia, porém no quesito velocidade de simulação obteve os piores resultados quando comparado aos outros dois métodos. Já o Filtro de Kalman, com relação à velocidade de simulação, obteve resultados medianos.

Portanto, para detecção de faltas em linhas de transmissão, o Filtro de Kalman e o Operador de Teager possuem os melhores resultados. O que pode diferenciar a escolha entre os dois métodos está na aplicação. O Operador de Teager para fazer a estimação da amostra atual, necessita da amostra seguinte. Sendo assim, o detector está sempre defasado de uma amostra, o que dificulta seu emprego em sistemas de detecção on line. Em contrapartida, o detector com Filtro de Kalman pode ser empregado para detecção on line, visto que para fazer a estimação da amostra atual, necessita apenas da amostra anterior. No entanto, este detector precisa ser melhorado para que o tempo de simulação diminua consideravelmente a ponto de conseguir prever se há ou não falta no sistema num tempo menor ou igual ao período do sistema.

As tabelas que mostram os resultados do detector baseado em Filtro de Kalman para todas as combinações de falta simuladas durante o monitoramento das tensões trifásicas, encontram-se nos anexos deste documento.

Para confirmar as análises apresentadas na seção 5.1.1, as tabelas Tabela 5-2 e Tabela 5-3 elucidam, para o método baseado no Filtro de Kalman, o desempenho do detector quando há variação dos parâmetros de aplicação da falta.

Tabela 5-2 - Desempenho do detector com Filtro de Kalman quando há variação do ponto de aplicação da falta com monitoramento de tensões trifásicas

Distance from substation [km]	Mean [ms]	Maximum [ms]	Minimum [ms]	Standard Deviation [ms]
0	0	0	0	0
20	0.06	0.06	0.06	0
40	0.12	0.12	0.12	0
60	0.18101	0.19	0.18	0.003029
80	0.244444	0.26	0.24	0.005754
100	0.310505	0.32	0.3	0.004134
120	0.374242	0.39	0.37	0.006561
140	0.440707	0.46	0.43	0.007857
160	0.505455	0.53	0.5	0.008953
180	0.566162	0.6	0.56	0.009226
09CCF Furnas Meio	0.279697	0.29	0.27	0.004619
TA500 Taubate	0.27	0.27	0.27	0
TP765 Tijuco Preto 765	0.603131	0.69	0.58	0.025898
CA500 Campinas	0.36697	0.76	0.24	0.154004
AN500 Angra	0.34	0.34	0.34	0
CP138 Cachoeira Paulista 138	0.01697	0.08	0.01	0.01403

Tabela 5-3 - Desempenho do detector com Filtro de Kalman quando há variação da resistência de falta nas faltas aplicadas internamente à LT com monitoramento de tensões trifásicas

Fault Resistance [Ohms]	Mean [ms]	Maximum [ms]	Minimum [ms]	Standard Deviation [ms]
0	0.280121	0.59	0	0.182494
5	0.280242	0.59	0	0.182504
20	0.280394	0.60	0	0.182579

Deste modo, é possível confirmar que a localização da falta interfere no instante de percepção do evento pelo detector. Do mesmo modo, percebe-se pela Tabela 5-3 que a resistência de falta não possui grande impacto no instante de percepção do evento pelo detector.

5.2.2. Detecção de evento no sistema de distribuição

Nesta etapa os detectores foram simulados variando apenas o tipo de evento aplicado, não houve variação dos parâmetros associados. A premissa utilizada para medição do tempo de simulação do detector foi a simulação de apenas um evento com monitoramento de tensões trifásicas.

Neste contexto, o detector que apresentou o menor erro associado à sua estimação foi o detector baseado em rede neural com inferência Bayesiana. Em contrapartida, o detector mais rápido é o que se baseia na metodologia do Operador de Teager para estimar o instante de tempo. O filtro de Kalman obteve resultados medianos tanto na sua acurácia, quanto na velocidade.

Tabela 5-4 - Desempenho dos métodos de detecção de eventos de qualidade de energia

Detector	Erro médio (s)	Tempo Médio de Simulação (s)
Bayesiano	0.00026 ± 0.00042	73.03278
Filtro de Kalman	0.03866 ± 0.07008	17.80972
Operador de Teager	0.12875 ± 0.12999	0.09123

As tabelas a seguir mostram os resultados de cada detector para os eventos simulados em qualidade de energia.

Tabela 5-5 - Desempenho do detector baseado em inferência Bayesiana

Número	Evento	Monitoramento	Instante de Aplicação do Evento (s)	Instante Estimado (s)	Erro (s)	Erro Absoluto
1	Sag	Tensão Monofásica	0.25000	0.25015	0.00015	0.00015
2	Swell	Tensão Monofásica	0.25000	0.25014	0.00014	0.00014
3	Sag c/ Harmônicos	Tensão Monofásica	0.25000	0.25061	0.00061	0.00061
4	Swell c/ Harmônicos	Tensão Monofásica	0.25000	0.25116	0.00116	0.00116
5	Sag	Tensões Trifásicas	0.25000	0.25000	0.00000	0.00000
6	Swell	Tensões Trifásicas	0.25000	0.25000	0.00000	0.00000
7	Sag c/ Harmônicos	Tensões Trifásicas	0.25000	0.25000	0.00000	0.00000

8	Swell c/ Harmônicos	Tensões Trifásicas	0.25000	0.25000	0.00000	0.00000
----------	------------------------	-----------------------	---------	---------	---------	---------

Nota-se que o detector com inferência Bayesiana é 100% preciso quando do monitoramento das tensões trifásicas.

Tabela 5-6 - Desempenho do detector baseado em Filtro de Kalman

Número	Evento	Monitoramento	Instante de Aplicacao do Evento (s)	Instante Estimado (s)	Erro (s)	Erro Absoluto (s)
1	Sag	Tensão Monofásica	0.25000	0.25003	0.00003	0.00003
2	Swell	Tensão Monofásica	0.25000	0.25003	0.00003	0.00003
3	Sag c/ Harmônicos	Tensão Monofásica	0.25000	0.25243	0.00243	0.00243
4	Swell c/ Harmônicos	Tensão Monofásica	0.25000	0.25186	0.00186	0.00186
5	Sag	Tensões Trifásicas	0.25000	0.09780	-0.15220	0.15220
6	Swell	Tensões Trifásicas	0.25000	0.09780	-0.15220	0.15220
7	Sag c/ Harmônicos	Tensões Trifásicas	0.25000	0.25000	0.00000	0.00000
8	Swell c/ Harmônicos	Tensões Trifásicas	0.25000	0.25054	0.00054	0.00054

No método baseado no Filtro de Kalman a acurácia do detector não é bem definida quanto à variável de monitoramento. O valor do erro varia de acordo com o tipo de evento associado à variável de monitoramento.

Tabela 5-7 - Desempenho do detector baseado no Operador de Energia de Teager

Número	Evento	Monitoramento	Instante de Aplicacao do Evento (s)	Instante Estimado (s)	Erro (s)	Erro Absoluto (s)
1	Sag	Tensão Monofásica	0.25000	0.25000	0.00000	0.00000
2	Swell	Tensão Monofásica	0.25000	0.28001	0.03001	0.03001
3	Sag c/ Harmônicos	Tensão Monofásica	0.25000	0.00001	-0.24999	0.24999
4	Swell c/ Harmônicos	Tensão Monofásica	0.25000	0.00001	-0.24999	0.24999
5	Sag	Tensões Trifásicas	0.25000	0.25000	0.00000	0.00000

6	Swell	Tensões Trifásicas	0.25000	0.24999	-0.00001	0.00001
7	Sag c/ Harmônicos	Tensões Trifásicas	0.25000	0.00001	-0.24999	0.24999
8	Swell c/ Harmônicos	Tensões Trifásicas	0.25000	0.00001	-0.24999	0.24999

Assim como no Filtro de Kalman, o detector baseado no Operador de Teager não é bem definido quanto ao desempenho frente a um tipo de monitoramento. Além disso, na presença de harmônicos na rede o método falhou, tendo em vista a dificuldade de se definir um valor de energia como limiar.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou técnicas para detecção automática de eventos tanto em linhas de transmissão, quanto em sistemas de distribuição. A avaliação se deu de forma prática com a elaboração e implementação do sistema de detecção no programa MATLAB®. Os critérios utilizados para avaliação dos detectores foram o tempo de simulação do detector para uma oscilografia com monitoramentos distintos e o erro médio associado à estimativa em relação ao valor real do instante de tempo que ocorre o defeito.

Para formulação das oscilografias de entrada no sistema de detecção automática, utilizou-se de formulações matemáticas capazes de representar um sistema de distribuição genérico, as quais foram desenvolvidas em [37]. Por outro lado, no sistema de transmissão, as oscilografias, apesar de geradas sinteticamente, foram modeladas de forma fidedigna ao sistema em estudo, LT Tijuco Preto – Cachoeira Paulista 500 kV – Circuito 2 de propriedade da Cachoeira Paulista Transmissora de Energia (CPTE).

Os métodos escolhidos para implementação no detector e posterior avaliação foram: rede neural com inferência Bayesiana para desenvolvimento de MLP, Filtro de Kalman e Operador de Energia de Teager. A escolha dos métodos baseou-se nos estudos realizados em [38] e [32], principalmente.

As variáveis para monitoramento do sistema de transmissão puderam ser escolhidas entre tensão monofásica da fase A, tensões trifásicas, corrente monofásica da fase A, correntes trifásicas e tensões e correntes trifásicas. No entanto, observou-se que o monitoramento de variáveis trifásicas é suficiente para o problema de detecção do evento de forma correta, visto que o monitoramento de variáveis monofásicas atrapalharia o desempenho do detector em se tratando de falta envolvendo uma ou mais fases não monitoradas. O monitoramento das correntes junto com as tensões se torna mais relevante

quando o objetivo é a classificação do defeito. Como o foco deste trabalho é apenas a detecção do defeito, monitorar as tensões trifásicas ou as correntes trifásicas torna-se suficiente para solução do problema.

Para o problema de distribuição, o monitoramento se restringiu às tensões trifásicas e monofásica da fase A. A restrição ocorreu devido à ausência de dados reais de um sistema de distribuição.

Os critérios utilizados para avaliar a ferramenta de melhor desempenho consistiu na análise do erro entre o instante de tempo detectado e o real e a avaliação do tempo de simulação computacional. Essas duas variáveis se tornam importantes quando da definição da aplicação do detector.

É importante destacar um fator crucial quando se trata de ferramenta para detecção automática de evento. Se o intuito é a aplicação *on line*, então o tempo médio que a ferramenta leva para detectar o instante da falta, é um fator relevante, tendo em vista sua aplicação para tomada de decisão. Por outro lado, quando trata-se de análise de eventos em um sistema de forma *off line*, como acontece por exemplo no setor de análise de defeitos nas empresas do ramo de sistemas de potência, o tempo para detecção não é o fator crucial e sim a precisão da ferramenta.

Devido à formulação matemática do Operador de Teager, pode-se concluir que sua utilização se restringe a aplicações *off line*, visto que para análise do instante t , o detector necessita do valor da variável no instante $t+1$, o que não ocorre nos métodos do Filtro de Kalman e Inferência Bayesiana. Por se tratar de um modelo autoregressivo, o Filtro de Kalman apenas necessita do instante de tempo anterior para prever o atual. Além disso, para seu treinamento, ou seja, para definição de seus parâmetros, basta uma amostra do sinal num intervalo de tempo anterior ao evento. De forma similar, o modelo baseado em inteligência artificial, a rede neural com Inferência Bayesiana, apenas necessita de uma amostra do sinal para que seja capaz de prever qualquer instante à frente. Portanto, os métodos do Filtro de Kalman e de Inferência Bayesiana se destacam quando se trata de previsão *on time*.

Neste sentido, para o problema de transmissão, a técnica baseada em Filtro de Kalman destacou-se em relação às outras técnicas avaliadas quando da análise da precisão do método. Em contrapartida, o método mais rápido na detecção de evento em sistema de transmissão foi o baseado no Operador de Teager.

Por outro lado, no sistema de distribuição, a técnica de detecção automática baseada em Inferência Bayesiana obteve melhores resultados quando da análise do erro médio de estimação, ou seja, este método é mais preciso do que os outros. No entanto, o Operador de Energia de Teager permaneceu sendo o mais rápido, haja vista a simplicidade dos cálculos envolvidos.

6.1. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista a possibilidade de utilização em tempo real da ferramenta desenvolvida neste trabalho para auxílio na tomada de decisão, uma linha de pesquisa interessante a ser seguida se concentra na redução do tempo de simulação do detector.

A ferramenta desenvolvida neste trabalho teve o objetivo de identificar o instante de início do evento, o que é perfeitamente apropriado para um sistema de transmissão, visto que a partir da identificação do defeito, alguma decisão deve ser tomada para sua extinção. No entanto, em se tratando do sistema de distribuição, é interessante analisar a duração do distúrbio, visto que pode ser um efeito transitório na rede, como o chaveamento de um banco de capacitores. Portanto, sugere-se o melhoramento deste sistema para que o mesmo seja capaz de estimar o período de duração do evento em questão.

Além disso, como proposta para trabalhos futuros, sugere-se a modelagem de uma gama maior de distúrbios em sistemas de distribuição, de preferência com dados realísticos para aproximar o resultado à realidade. Outra linha de pesquisa interessante a ser incentivada concentra-se na habilitação da ferramenta para detecção de ilhamento e saída de geração.

Para a implementação de uma ferramenta completa que seja capaz de diagnosticar um evento num sistema, seja ele de distribuição ou transmissão, faz-se necessário o desenvolvimento dos módulos de classificação e localização de eventos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, “Resolução Normativa 512/2010”, 30 de outubro de 2012.
- [2] ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, “Resolução Normativa 270/2007”, 26 de junho de 2007.
- [3] D. D. Ferreira, “Análise de Distúrbios Elétricos em Sistemas de Potência”, Tese de Doutorado, Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE, 2010.
- [4] S. Cerqueira, C. A. Duque, R. M. Trindade, M. V. Ribeiro, “Sistema Digital de Detecção e Classificação de Eventos de Qualidade de Energia”, Revista IEEE América Latina, 2005.
- [5] H. W. Dommel, “Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multi-Phase Networks,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-88, n. 4, pp. 388–399, Apr. 1969.
- [6] Manitoba HVDC Research Center, "PSCAD/EMTDC Simulation Program-V4.2,User's Manual" - Winnipeg Canada, 2005.
- [7] LászlóPrikler, Hans Kristian Høidalen "ATPDRAW version 5.6 Users' Manual", 2009.
- [8] MATLAB and SIMULINK Release 2012b, TheMathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.
- [9] S. R. Naidu, "Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência", Editora Grafset, Campina Grande, 1985.
- [10] L. C. Zanetta Jr., "Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência", EDUSP, São Paulo, 2003.
- [11] N. Watson, J. Arrillaga, "Power Systems Electromagnetic Transients Simulation", IEE Power and Energy Series 39, 2003.
- [12] A. E. A. Araújo, W. L. A. Neves, "Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia", Editora UFMG, Belo Horizonte, 2005.

- [13] W. F. Tinney and J. W. Walker, "Direct Solutions of Sparse Network Equations by Optimally Ordered Triangular Factorization," *Proceedings of IEEE*, vol. 55, pp. 1801-1809, November 1967.
- [14] L. Bergeron, *Du Coup de Belier enHydraulique au Coup deFoudreenElectricite*. Paris: Dunod, 1949. Transl., *Water Hammer in Hydraulics and Wave Surges in Electricity* (Translating Committee sponsored by ASME). New York: Wiley, 1961.
- [15] L. M. Wedepohl, "Application of Matrix Methods to the Solution of Travelling-Wave Phenomena in PolyphaseSystems," *Proc. Inst. Elect. Eng.*, vol. 110, n. 12, pp. 2200–2212, Dec. 1963.
- [16] D. E. Hedman, "Propagation on Overhead Transmission Lines I- Theory of Modal Analysis",*IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-84, pp. 200-211, March 1965; discussion, pp. 489-492, June 1965.
- [17] L. M. Wedepohl and S. E. T. Mohamed, "MulticonductorTransmission Lines: Theory of Natural Modes and Fourier Integrals Applied to Transient Analysis," *Proc. Inst. Elect. Eng.*, vol. 116, n. 9, pp. 1553–1563, Sep. 1969.
- [18] M. H. Hesse, "Electromagnetic and Electrostatic Transmission-Line Parameters by Digital Computer", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 82, n. 66, pp. 282-291, June 1963.
- [19] H. B. Dwight, "Skin Effect in Tubular and Flat Conductors",*AIEE Transactions*, vol. 37, pt. II, pp. 1379–1403, 1918.
- [20] J. Carson. "Wave Propagation in Overhead Wires with Ground Return", *Bell System Technical Journal*, vol. 5, n. 4, pp. 539-554, 1926.
- [21] A. Semlyen and A. Dabuleanu, "Fast and Accurate Switching Transient Calculations on Transmission Lines and Ground Return Using Recursive Convolutions", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-94, pp. 561-571, March/April 1975.
- [22] A. Deri, G. Tevan, A. Semlyen, and A. Castanheira, "The Complex Ground Return Path: A Simplified Model for Homogeneous and Multilayer Earth Return",*IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-100, n. 8, pp. 3686–3693, Aug. 1981.

- [23] J. Marti, "Accurate Modeling of Frequency Dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transients Simulation", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, n. 1, pp. 147-157, Jan. 1982.
- [24] A. Morched, B. Gustavsen, and M. Tartibi, "A Universal Model for Accurate Calculation of Electromagnetic Transients on Overhead Lines and Underground Cables", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, n. 3, pp. 1032–1038, Jul. 1999.
- [25] B. Gustavsen and A. Semlyen, "Rational Approximation of Frequency Domain Responses by Vector Fitting", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, n. 3, pp. 1052–1061, Jul. 1999.
- [26] T. Noda, N. Nagaoka, and A. Ametani, "Phase Domain Modeling of Frequency-Dependent Transmission Lines by Means of an ARMA Model", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, n. 1, pp. 401–411, Jan. 1996.
- [27] T. Noda, N. Nagaoka and A. Ametani, "Further Improvements to a Phase-Domain ARMA Line Modeling Terms of Convolution Steady-State Initialization and Stability", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 12, no.3, pp. 1327-1334, July 1997.
- [28] B. Gustavsen and A. Semlyen, "Admittance-Based Modeling of Transmission Lines by a Folded Line Equivalent", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, n. 1, pp. 231-239, January 2009.
- [29] C.M. Portela, J.B. Gertrudes, M.C. Tavares and J. Pissolato, "Earth Conductivity and Permittivity Data Measurements: Influence in Transmission Line Transient Performance", *Electric Power Systems Research*, vol. 76, n. 11, pp. 907-915, July 2006.
- [30] N.I. Elkalashy, M. Lehtonen, H.A. Darwish, M.A. Izzularab and A.-M.I. Taalab, "Modeling and Experimental Verification of High Impedance Arcing Fault in Medium Voltage Networks", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 14, n. 2, pp. 375-383, April 2007.
- [31] T. Funabashi, H. Ootoguro, Y. Mizuma, L. Dube, M. Kizilcay and A. Ametani, "Influence of Fault Arc Characteristics on the Accuracy of Digital Fault

- Locators", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.16, n. 2, pp. 195-199, Apr 2001.
- [32] A. E. Lazzaretti, "Segmentação, classificação e detecção de novas classes de eventos em oscilografias de redes de distribuição de energia elétrica", Tese de Doutorado, Curitiba, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.
- [33] C. A. Duque, M. V. Ribeiro, F. R. Ramos, J. Szczupak, "Power Quality Event Detection Based on the Divide ena Conquer Principle and Innovation Concept", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 20, No 4, Oct. 2005.
- [34] L. C. Zanetta Jr., C. E. M. Pereira, A. A. C. Arruda, "Equivalentes de Redes Elétricas para Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos no Programa ATP"
- [35] V.H. Ferreira, C.H.C. Guimarães, G.G. Sotelo, J.C.S. de Souza, M.Z. Fortes, S.G. Júnior, R. Zanghi, R.B.M. Silva, V.R. de Oliveira, B. Chuco, M. Gonçalves, "Sistema Inteligente para Diagnóstico de Faltas em Linhas de Transmissão, ETAPA 3: Desenvolvimento da Metodologia para Análise e Diagnóstico de Faltas em Linhas de Transmissão – Modelagem da Rede Equivalente e Estudo dos Transitórios de Curto-Circuito na LT 500 kV T. Preto / C. Paulista C2", Relatório Técnico de Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento, Abril/2015.
- [36] V.H. Ferreira, C.H.C. Guimarães, G.G. Sotelo, J.C.S. de Souza, M.Z. Fortes, S.G. Júnior, R. Zanghi, R.B.M. Silva, V.R. de Oliveira, B. Chuco, M. Gonçalves, "Sistema Inteligente para Diagnóstico de Faltas em Linhas de Transmissão, ETAPA 3: Desenvolvimento da Metodologia para Análise e Diagnóstico de Faltas em Linhas de Transmissão – Geração dos Cenários de Falta a serem Analisados pelo Sistema Inteligente", Relatório Técnico de Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento, Abril/2015.
- [37] T. K. Abdel-Galil, M. Kamel, A. M. Youssef, E. F. El-Saadany, M. M. A. Salama, "Power quality disturbance classification using inductive inference approach", *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, No. 4, Oct 2004.
- [38] V.H. Ferreira, "Desenvolvimento de Modelos Neurais Autônomos para Previsão de Carga Elétrica", Tese de Doutorado, Rio de Janeiro, UFRJ/COPPE, 2008.

- [39] A. Ukil and R. Zivanovic, "Application of Abrupt Change Detection in Power Systems Disturbance Analysis and Relay Performance Monitoring", *IEEE Transactionson Power Delivery*, vol. 22, n. 1, pp. 59-66, Jan. 2007.
- [40] S.R. Mohanty, A.K. Pradhan and A. Routray, "A Cumulative Sum-BasedFault Detector for Power System RelayingApplication", *IEEE Transactionson Power Delivery*, vol. 23, n. 1, pp. 79-86, Jan. 2008.
- [41] A. Ukil and R. Živanović, "Abrupt Change Detection in Power System Fault Analysis Using Adaptive Whitening Filter and Wavelet Transform", *Electric Power Systems Research*, vol. 76, n. 9–10, pp. 815-823, June 2006.
- [42] C. Aguilera, E. Orduna and G. Ratta, "FaultDetection, Classification and FaultedPhaseSelection Approach Basedon High-FrequencyVoltageSignalsAppliedto a Series-CompensatedLine", *IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution*, vol. 153, n. 4, pp. 469-475, 13 July 2006.
- [43] D.K. Ibrahim, E.S.T. Eldin, E.M. Aboul-Zahab and S.M. Saleh, "Real Time Evaluationof DWT-based High ImpedanceFaultDetection in EHV Transmission", *Electric Power Systems Research*, pp. 907-914, vol. 80, n. 8, August 2010.
- [44] D. Chanda, N.K. Kishore and A.K. Sinha, "ApplicationofWaveletMultiresolutionAnalysis for Identification and ClassificationofFaultsonTransmissionLines", *Electric Power Systems Research*, vol. 73, n. 3, pp. 323-333, March 2005.
- [45] J. Liang, S. Elangovan and J.B.X. Devotta, "A WaveletMultiresolutionAnalysis Approach toFaultDetection and Classification in TransmissionLines", *InternationalJournalofElectrical Power & Energy Systems*, vol. 20, n. 5, pp. 327-332, June 1998.
- [46] C.-H. Kim, H. Kim, Y.-H. Ko, S.-H. Byun, R.K. Aggarwal and A.T. Johns, "A Novel Fault-detectionTechniqueof High-impedanceArcingFaults in TransmissionLinesUsing the WaveletTransform", *IEEE Transactionson Power Delivery*, vol. 17, n. 4, pp. 921-929, Oct 2002.
- [47] Z. He, L. Fu, S. Lin and Z. Bo, "FaultDetection and Classification in EHV TransmissionLineBasedonWavelet Singular Entropy", *IEEE Transactionson Power Delivery*, vol. 25, n. 4, pp. 2156-2163, Oct. 2010.

- [48] M. García-Gracia, A. Montañés, N. El Halabi and M.P. Comech, “High Resistive Zero-crossing Instant Faults Detection and Location Scheme Based on Wavelet Analysis”, *Electric Power Systems Research*, vol. 92, pp. 138-144, November 2012.
- [49] H. Jung, Y. Park, M. Han, C. Lee, H. Park and M. Shin, “Novel Technique for Fault Location Estimation on Parallel Transmission Lines Using Wavelet”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 29, n. 1, pp. 76-82, January 2007.
- [50] A.M. El-Zonkoly and H. Desouki, “Wavelet Entropy Based Algorithm for Fault Detection and Classification in FACTS Compensated Transmission Line”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 33, n. 8, pp. 1368-1374, October 2011.
- [51] S. El Safty and A. El-Zonkoly, “Applying Wavelet Entropy Principle in Fault Classification”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 31, n. 10, pp. 604-607, November–December 2009.
- [52] J. Upendar, C.P. Gupta and G.K. Singh, “Statistical Decision-tree Based Fault Classification Scheme for Protection of Power Transmission Lines”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 36, n. 1, pp. 1-12, March 2012.
- [53] D.M. Gilbert and I.F. Morrison, “A Statistical Method for the Detection of Power System Faults”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 19, n. 4, pp. 269-275, May 1997.
- [54] N.I. Elkalashy, N.G. Tarhuni and M. Lehtonen, "Simplified Probabilistic Selectivity Technique for Earth Fault Detection in Unearthed MV networks", *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 3, n. 2, pp. 145-153, February 2009.
- [55] F.N. Chowdhury, J.P. Christensen and J.L. Aravena, "Power System Fault Detection and State Estimation Using Kalman Filter with Hypothesis Testing", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, n. 3, pp. 1025-1030, Jul 1991.
- [56] J. Barros, J.M. Drake, "Realtime Fault Detection and Classification in Power Systems Using Microprocessors", *IEE Proceedings – Generation, Transmission and Distribution*, vol. 141, n. 4, pp. 315-322, Jul 1994.

- [57] V. Cherkassky and F. Mulier; Learning from Data: Concepts, Theory and Methods, John Wiley & Sons, New York, USA, 1998.
- [58] S. Haykin, Neural Networks and Learning Machines, Prentice Hall, 3rd. Edition, 2008.
- [59] V.H. Ferreira and A.P. Alves da Silva, "ChaosTheoryAppliedto Input Space RepresentationofAutonomous Neural Network-based Short-termLoadForecastingModels", Controle & Automação (Impresso), v. 22, p. 585-597, 2011.
- [60] S. Amari, N. Murata, K.R. Muller, M. Finke and H. Yang, "Statistical Theory of Overtraining – Is Cross-Validation Asymptotically Effective?", Advances in Neural Information Processing Systems, v.8, MIT Press, pp. 176-182, 1996.
- [61] Z. Catatelpé, Y.S. Abu-Mostafa and M. Magdon-Ismael, "No Free Lunch for Early Stopping", Neural Computation, v.11, n.4, pp. 995-1009, May 1999.
- [62] V.N. Vapnik, Statistical Learning Theory, New York, John Wiley & Sons, 1998.
- [63] M. Kezunovic and I. Rikalo, "Detect and Classify Faults Using Neural Nets", IEEE Computer Applications in Power, vol.9, no.4, pp. 42-47, Oct 1996.
- [64] K.M. Silva, B.A. Souza and N.S.D. Brito, "Fault Detection and Classification in Transmission Lines Based on Wavelet Transform and ANN", IEEE Transactions on Power Delivery, vol.21, no.4, pp. 2058-2063, Oct. 2006.
- [65] A.A. Yusuff, A.A. Jimoh and J.L. Munda, "Determinant-based Feature Extraction for Fault Detection and Classification for Power Transmission Lines", IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 5, n. 12, pp. 1259-1267, December 2011.
- [66] Base de Dados de Curto-Circuito: ONS = SISTEMA INTERLIGADO = CONFIG DEZ/2014 = VERSÃO 21/01/2014 = BR1412PV.ANA;
- [67] ONS, Planejamento da Operação Elétrica Anual - Casos de Referência – Regime Permanente – ONS * PAR 14-16 * 01/11/13 *
- [68] ONS – Procedimentos de Rede: Submódulo 23.3 – Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos;
- [69] Base de Dados de Curto-Circuito: ONS = SISTEMA INTERLIGADO = CONFIG DEZ/2014 = VERSÃO 21/01/2014 = BR1412PV.ANA;

- [70] ONS, Planejamento da Operação Elétrica Anual - Casos de Referência – Regime Permanente – ONS * PAR 14-16 * 01/11/13 *
- [71] FURNAS Centrais Elétricas – Biblioteca de Modelos das Linhas de Transmissão do Sistema FURNAS para o PSCAD/EMTDC – Nota Técnica DEE.O – 007/97.
- [72] V.H. Ferreira, C.H.C. Guimarães, G.G. Sotelo, J.C.S. de Souza, M.Z. Fortes, S.G. Júnior, R. Zanghi, R.B.M. Silva, V.R. de Oliveira, B. Chuco, M. Gonçalves, “Sistema Inteligente para Diagnóstico de Falhas em Linhas de Transmissão, ETAPA 2: Levantamento de Dados e Informações”, Relatório Técnico de Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento, Julho/2014.