

**DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS EM  
LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO ANÁLISE  
FUNCIONAL E INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL**

ANDRÉ DE SOUZA GOMES

**DETECÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE FALTAS EM  
LINHAS DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO ANÁLISE  
FUNCIONAL E INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: MARCELO AZEVEDO COSTA

COORIENTADOR: WALMIR MATOS CAMINHAS

Belo Horizonte – MG

Junho de 2011

© 2011, André de Souza Gomes.  
Todos os direitos reservados.

Gomes, André de Souza.

G633d Detecção e classificação de faltas em linhas de transmissão  
utilizando análise funcional e inteligência computacional [manuscrito]  
/ André de Souza Gomes. – 2011.  
xiv, 68 f., enc.: il.

Orientador: Marcelo Azevedo Costa.

Coorientador: Walmir Matos Caminhas.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais,  
Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 65-68.

1. Engenharia elétrica – Teses. I. Costa, Marcelo Azevedo. II.  
Caminhas, Walmir Matos. III. Universidade Federal de Minas Gerais,  
Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 621.3(043)

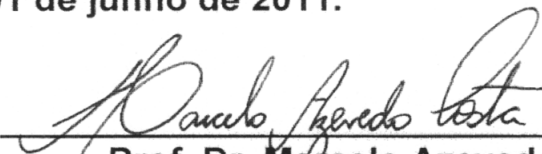
**"Detecção e Classificação de Falhas em Linhas de Transmissão Utilizando Análise Funcional e Inteligência Computacional"**

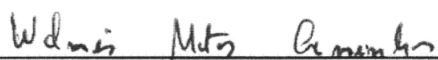
**André de Souza Gomes**


Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

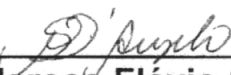
Aprovada em 01 de junho de 2011.

Por:

  
Prof. Dr. Marcelo Azevedo Costa  
EST (UFMG) - Orientador

  
Prof. Dr. Walmir Matos Caminhas  
DELT (UFMG) - Co-Orientador

  
Prof. Dr. Wallace do Couto Boaventura  
DEE (UFMG)

  
Prof. Dr. Marcos Flávio S. V. D'Angelo  
DCC (UNIMONTES)

*Dedico a Deus pela presença em minha vida, aos meus pais e irmãos, que sempre deram todo apoio necessário para que eu chegasse até aqui.*

# Abstract

The transmission line is the most vulnerable element of the Electric Power System due to its great physical dimension. Several fault diagnosis algorithms have been proposed in the literature, especially methods that use signal analysis and computational intelligence. This work proposes a new modeling that functionally represents the transmission line phases. In the proposed model, the nominal behavior of voltage and current signals are projected onto a two-dimensional space, represented by a conic equation. The detection and classification strategy is developed from the analysis of the model's parameters. The proposed methodology is evaluated using a set of simulated faults, obtained by varying the fault parameters. The results are satisfactory and demonstrate the viability of the proposed methodology to detect the moment of failure and your classification.

**Keywords:** Fault Detection, Fault Classification, Transmission Line.

# Resumo

A linha de transmissão é o elemento do Sistema Elétrico de Potência mais vulnerável a faltas devido à sua grande dimensão física. Vários algoritmos para diagnóstico de faltas tem sido propostos na literatura, destacando-se os métodos que utilizam análise de sinais e inteligência computacional. Neste trabalho é proposta uma nova modelagem para a representação funcional das fases de uma linha de transmissão. No modelo proposto, o comportamento nominal dos sinais de tensão e corrente são projetados em um espaço bidimensional, representado por uma equação cônica. A estratégia de detecção e classificação é desenvolvida a partir da análise dos parâmetros desse modelo. A metodologia proposta é avaliada usando um conjunto de faltas simuladas, obtidas sob variações de parâmetros da falta. Os resultados são satisfatórios e demonstram a viabilidade da metodologia proposta para detectar o momento da falta e sua classificação.

**Palavras-chave:** Detecção de Faltas, Classificação de Faltas, Linha de Transmissão.

# Lista de Figuras

2.1	Estrutura básica de um sistema elétrico [19]. . . . .	5
2.2	Torre de uma linha de transmissão. . . . .	6
2.3	Falta simulada tipo curto-circuito - fase AB. . . . .	8
2.4	Falta simulada tipo curto-circuito - fase ABC. . . . .	8
2.5	Falta simulada tipo curto-circuito - fase AC. . . . .	9
2.6	Falta simulada tipo curto-circuito - fase ABG. . . . .	9
2.7	Falta simulada tipo curto-circuito - fase ACG. . . . .	10
2.8	Falta simulada tipo curto-circuito - fase AG. . . . .	10
2.9	Falta simulada tipo circuito aberto - fase ABO. . . . .	11
2.10	Falta simulada tipo circuito aberto - fase ACO. . . . .	11
2.11	Falta simulada tipo circuito aberto - fase AO. . . . .	12
3.1	Fluxograma do algoritmo proposto para detecção de faltas em linhas de transmissão [16]. . . . .	15
4.1	Forma de onda da tensão e corrente em um sistema trifásico, sob condições nominais. . . . .	22
4.2	Triângulo representando a relação das potências aparente (S), ativa (P) e reativa (Q). . . . .	23
4.3	Comportamentos elípticos de uma fase da linha de transmissão para valores diferentes de fator de potência. . . . .	24
4.4	Comportamentos elípticos de uma fase da linha de transmissão para diferentes valores de pico da corrente. . . . .	24
4.5	Elipses com presença da componente estocástica. . . . .	34
4.6	Comportamento simulado entre a distância média e o parâmetro de dispersão $\sigma$ . . . . .	37
4.7	Comportamento simulado entre a distância média e o parâmetro de dispersão $\sigma$ utilizando FFT. . . . .	38

4.8	Limites inferiores e superiores da elipse definidos a partir da modelagem do ruído. . . . .	39
4.9	Etapas de pré-processamento de uma amostra de tensão e corrente. . .	42
4.10	Limites inferiores e superiores definidos a partir da modelagem do ruído.	43
4.11	Fluxograma do monitoramento proposto para detecção de possível falta na linha de transmissão, por fase. . . . .	44
5.1	Modelo do SEP utilizado para simulações de faltas [16]. . . . .	50
5.2	Modelo de SEP implementado no PSCAD [16]. . . . .	50
5.3	Falta simulada tipo curto-circuito entre fases AB. . . . .	52
5.4	Falta simulada tipo curto-circuito entre fases ABC. . . . .	53
5.5	Falta simulada tipo curto-circuito entre fase A e terra. . . . .	53
5.6	Falta simulada tipo curto-circuito entre fases AB e terra. . . . .	53
5.7	Falta simulada tipo circuito aberto nas fases AB. . . . .	54
5.8	Falta simulada tipo circuito aberto na fase A. . . . .	54
5.9	Visualização da separação das classes no espaço 2D. . . . .	55
5.10	Visualização da separação das classes no espaço 2D. . . . .	55
5.11	Visualização da separação das classes no espaço 2D. . . . .	55
5.12	Visualização da separação das classes no espaço 2D. . . . .	56
5.13	Visualização da separação das classes no espaço 2D. . . . .	56
5.14	Falta tipo queimada. . . . .	59
5.15	Falta tipo queimada. . . . .	59
5.16	Falta tipo entrelaçamento de cabos. . . . .	59
5.17	Falta tipo entrelaçamento de cabos. . . . .	60
5.18	Falta tipo descarga elétrica. . . . .	60
5.19	Falta tipo descarga elétrica. . . . .	60
5.20	Falta tipo queda de árvore. . . . .	61
5.21	Falta tipo queda de árvore. . . . .	61

# Lista de Tabelas

2.1	Ocorrência de faltas no SEP em um sistema de 500 <i>kV</i> , num período de 10 anos. . . . .	6
4.1	Lógica de decisão. . . . .	46
5.1	Resultados de classificação . . . . .	56
5.2	Base de dados da Cemig. . . . .	58
5.3	Matriz de confusão. . . . .	61

# Lista de Abreviaturas

AB Falta fases AB

ABC Falta fases ABC

ABG Falta fases AB com terra

AC Falta fases AC

ACG Falta fases AC com terra

AG Falta fase A com terra

AIRS *Artificial Immune Recognition System*

ATP/EMTP *Alternative Transients Program/Eletromagnetic Transients Program*

BC Falta fases BC

BCG Falta fases BC com terra

BG Falta fase B com terra

CA Corrente Alternada

CC Corrente Contínua

CG Falta fase C com terra

db4 Wavelet daubechies 4

DFT *Discrete Fourier Transform*

DT *Decision Table*

DWT *Discrete Wavelet Transform*

EHV *Extra High Voltage*

FFT *Fast Fourier Transform*

FIRANN *Finite Impulse Response Artificial Neural Network*

FP *Fator de Potência*

KNN *K Nearest Neighbors*

LG *Line-Ground*

LL *Line-Line*

LLG *Line-Line-Ground*

LLL *Line-Line-Line*

LLO *Line-Line-Open*

LO *Line-Open*

MLP *Multilayer Perceptron*

NB *Naïve Bayes*

PSO *Particle Swarm Optimisation*

RBF *Radial Basis Function*

RNA *Redes Neurais Artificiais*

SEP *Sistema Elétrico de Potência*

SVD *Singular Value Decomposition*

SVM *Support Vector Machine*

WSE *Wavelet Singular Entropy*

# Sumário

<b>Abstract</b>	<b>vi</b>
<b>Resumo</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>viii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>xi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação . . . . .	2
1.2 Objetivo . . . . .	2
1.3 Proposta . . . . .	3
1.4 Organização do trabalho . . . . .	3
<b>2 Sistemas Elétricos de Potência</b>	<b>4</b>
2.1 Linha de transmissão . . . . .	4
2.2 Tipos de falta envolvidas . . . . .	5
<b>3 Diagnóstico de Falhas</b>	<b>13</b>
3.1 Métodos baseados em sistemas inteligentes . . . . .	14
3.2 Trabalhos recentes sobre detecção e classificação de falhas . . . . .	16
<b>4 Metodologia</b>	<b>21</b>
4.1 Introdução . . . . .	21
4.2 Representação geométrica do comportamento de uma linha de transmissão . . . . .	25
4.2.1 Estimando os coeficientes de uma secção cônica . . . . .	27
4.2.2 Rotação e translação de uma secção cônica no plano cartesiano	29

4.2.3	Inserindo uma componente estocástica . . . . .	32
4.2.4	Construção de intervalos de confiança . . . . .	39
4.3	Detecção da falta . . . . .	41
4.3.1	Monitoramento das fases . . . . .	42
4.4	Métodos de classificação . . . . .	43
4.4.1	Classificador via Rede Bayesiana - BayesNet . . . . .	46
4.4.2	Combining Naive Bayes and Decision Tables - DTNB . . . . .	47
4.4.3	Aprendizado baseado em instância - IBk . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>49</b>
5.1	Descrição da base de dados simulada . . . . .	49
5.2	Resultados obtidos com a base simulada . . . . .	54
5.3	Descrição da base de dados da Cemig . . . . .	57
5.4	Resultados obtidos com a base da Cemig . . . . .	58
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>63</b>
6.1	Trabalhos futuros . . . . .	64
6.2	Produção científica . . . . .	64
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>65</b>

# Capítulo 1

## Introdução

Um Sistema Elétrico de Potência (SEP) está sujeito a ocorrências de faltas comprometendo a continuidade do fornecimento de energia elétrica, visto que, é composto por diversos componentes que podem se danificar ao longo do tempo e está sujeito a interferências externas, como descargas elétricas, quedas de árvores, entre outros, além de falta provocada pela operação humana. Restabelecer o serviço de fornecimento de energia elétrica satisfazendo os interesses tanto da concessionária quanto do cliente, não é uma tarefa fácil. Esse restabelecimento do serviço é basicamente subdividido em dois tipos de problemas, restauração e reconfiguração.

Na restauração, o objetivo é tentar restabelecer o serviço de fornecimento de energia elétrica no menor tempo e da melhor forma possível, após o diagnóstico da falta ocorrida, através da sua detecção, localização e classificação. Esse problema tem a restrição de tempo, pois o cliente não pode esperar muito até que a melhor configuração possível seja encontrada para ser restabelecida. Para o problema de reconfiguração, o benefício é estritamente da concessionária, porque dependendo de como se encontra o estado da rede, podem existir perdas excessivas que não necessariamente deveriam estar acontecendo. O objetivo é, então, buscar outra reconfiguração de forma que minimize a perda do sistema. Essa reconfiguração é feita de forma que o consumidor nem perceba as alterações. As perdas sempre vão existir, pois o sistema não é ideal, mas a redução das perdas excessivas é de grande interesse da concessionária.

Faltas ou equipamentos faltosos no sistema podem impedir o fornecimento normal de energia elétrica, fato que ocasiona perdas econômicas substanciais para as empresas consumidoras. Por sua vez, o público em geral mede a qualidade do fornecimento de energia elétrica pela continuidade de seu fornecimento. Sabe-se ainda que faltas não detectadas e não localizadas podem fornecer um risco para a

população, já que a corrente de falta pode atingir níveis extremamente perigosos. Assim, pode-se dizer que a detecção e classificação de faltas no sistema elétrico é de interesse geral da sociedade bem como o estudo de metodologias para solução deste problema, sendo este último o grande motivador da dissertação.

## 1.1 Motivação

Detecção localização e classificação de faltas em SEPs é uma área de importância estratégica para diversos setores da sociedade. Concessionárias de energia elétrica necessitam detectar, localizar e classificar faltas no sistema elétrico de modo a isolar o(s) elemento(s) faltoso(s) em um tempo mínimo e criar medidas preventivas. Esta caracterização prematura da falta capacita equipes de manutenção à resolução/reparação do(s) equipamento(s) faltoso(s) possibilitando assim a retomada da operação normal do sistema em um curto espaço de tempo.

Em linhas de transmissão a proteção é realizada a partir um sistema composto basicamente de disjuntores, transdutores e relés. Atualmente, os relés do sistema de proteção são totalmente digitais, baseados em microprocessadores. Várias são as funções realizadas pelos relés, como proteção, supervisão, entre outras. O procedimento de proteção realizado pelo relé digital é normalmente dividido em tarefas distintas, como detecção, classificação e localização da falta. Em cada uma das etapas, diferentes algoritmos podem ser utilizados [30].

O diagnóstico de faltas em linhas de transmissão ainda não é uma tarefa trivial, mesmo com todo o esforço realizado nos últimos tempos. Visto que, existem inúmeros fatores que afetam a eficácia dos métodos existentes, tais como resistência da falta, distância da falta, ângulo de incidência da falta, ruídos nos sinais, dentre outros [17].

## 1.2 Objetivo

Esta dissertação tem como objetivo apresentar uma nova abordagem para detecção e classificação de faltas em linhas de transmissão trifásicas. As faltas são do tipo curto-circuito entre fases, curto-circuito entre fases e terra e tipo circuito aberto, simuladas sob várias condições em que a falta pode ocorrer, como distância, resistência, ângulo de incidência e ângulo de carga do sistema. É proposta uma nova modelagem matemática para descrever o comportamento funcional das fases, sob condições normais de operação. A detecção e classificação de faltas é feita a partir da análise desse modelo funcional.

## 1.3 Proposta

Neste trabalho é proposto um novo modelo para a representação funcional das fases de uma linha de transmissão. O comportamento das fases é representado no espaço bidimensional por uma elipse. A partir da equação que define o comportamento estático de cada fase e de uma amostra dos sinais de tensão e corrente, é possível estimar os parâmetros que definem os sinais como, valores de pico e fator de potência.

A partir deste modelo elíptico, definido para cada fase da linha de transmissão, o ruído presente nos sinais é estimado e, com isso, estabelece um intervalo de confiança e constrói uma região de controle que monitora cada fase, com o objetivo de detectar uma possível falta.

Ao detectar uma falta, a etapa de classificação proposta utiliza-se de uma nova elipse, estimada para o sinal pós-falta, para a caracterizar a falta. Considerando que, a elipse da falta no espaço bidimensional sofre variações na sua estrutura e localização em relação ao plano cartesiano, quando diferentes tipos de faltas ocorrem, características dessa elipse são extraídas como padrões de entrada para um classificador.

A avaliação da metodologia é realizada com faltas do tipo curto-circuito entre fases, curto-circuito entre fases e terra e fase aberta. As faltas foram geradas a partir de um SEP simulado no software PSCAD [25], levando em consideração diferentes condições de faltas. Também foi feita uma classificação utilizando dados de faltas reais obtidas através da Cemig. A classificação é realizado por algoritmos de classificação presentes na ferramenta Weka [13].

## 1.4 Organização do trabalho

Este trabalho está organizado na seguinte forma: é apresentado no Capítulo 2 uma breve revisão sobre SEPs, linhas de transmissão e os tipos de faltas envolvidas. Em seguida, no Capítulo 3 uma revisão bibliográfica referente aos métodos de detecção e localização de faltas é apresentada. No Capítulo 4 é apresentada a metodologia para detecção e classificação de faltas em linhas de transmissão. No Capítulo 5 são expostos os resultados obtidos pela metodologia proposta. Por fim, no Capítulo 6 são feitas as considerações finais e sugestões de trabalhos futuros.

## Capítulo 2

# Sistemas Elétricos de Potência

O SEP é responsável pelo fornecimento da energia elétrica consumida em todo o país. Seu objetivo é gerar, transmitir e distribuir energia elétrica atendendo a determinados padrões de confiabilidade, disponibilidade, qualidade, segurança e custos, com o mínimo impacto ambiental e o máximo de segurança pessoal [19]. É composto por diversos componentes como usinas geradoras de energia elétrica, subestações, transformadores elevadores e abaixadores, linhas de transmissão, linhas de sub-transmissão e linhas de distribuição (Figura 2.1).

Cada componente do sistema elétrico realiza uma função específica e bem definida. Os geradores de energia transformam uma determinada forma de energia (mecânica, térmica, eólica ou solar) em energia elétrica e injetam a energia gerada nas linhas de transmissão. As linhas de transmissão são responsáveis por ligar as grandes usinas de geração às áreas de grande consumo realizando o transporte de energia elétrica. Em geral, apenas poucos consumidores com um alto consumo de energia elétrica são conectados às redes de transmissão onde predomina a estrutura de linhas aéreas. A linha de sub-transmissão recebe energia da linha de transmissão com objetivo de transportar energia elétrica a pequenas cidades ou consumidores industriais. As redes de distribuição alimentam consumidores industriais de médio e pequeno porte, consumidores comerciais, de serviços e residenciais [19].

### 2.1 Linha de transmissão

As linhas de transmissão são os elementos do sistema elétrico que transportam toda a energia gerada até o consumidor. Dependendo do local da geração e do consumo, elas podem ter comprimentos variados, e por este motivo, apresentam

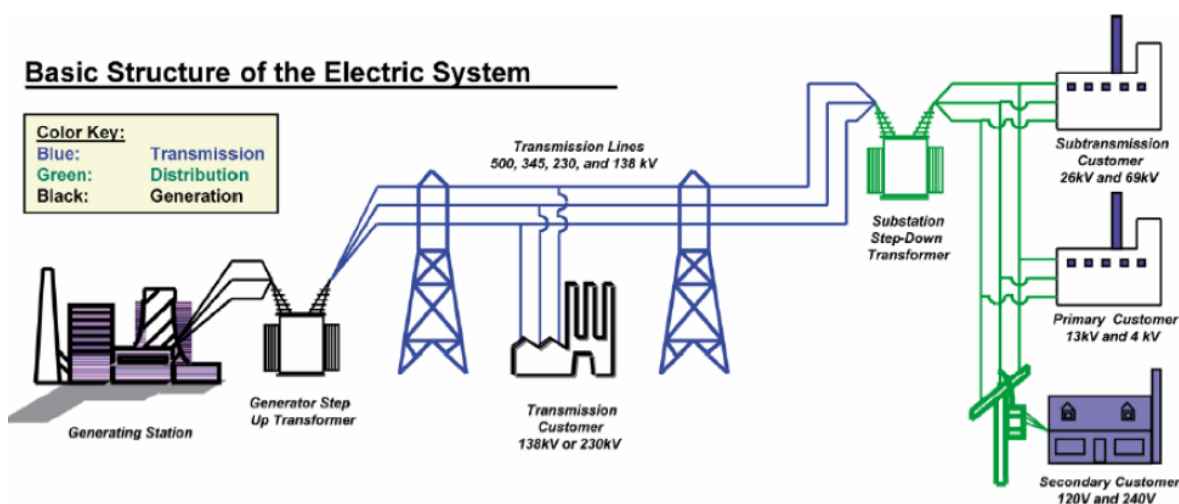


Figura 2.1: Estrutura básica de um sistema elétrico [19].

modelos distintos. Quanto ao comprimento são classificadas como: linhas curtas - até 80 *km*, linhas médias, de 80 à 240 *km* e linhas longas, mais de 240 *km* [7].

A transmissão da energia elétrica pode ocorrer em corrente alternada (CA) ou em corrente contínua (CC). Dentre os sistemas em CA, o trifásico tornou-se o mais conveniente, por razões técnicas e econômicas, e passou a ser o padrão para a geração, transmissão e distribuição de energia em CA. As cargas ligadas ao sistema trifásico normalmente são equilibradas, ou seja, constituídas por três impedâncias iguais, ligadas em estrela ou em triângulo [26]. As linhas aéreas trifásicas compreendem o objeto de estudo deste trabalho. A Figura 2.2 apresenta uma torre de linha de transmissão aérea.

## 2.2 Tipos de falta envolvidas

De acordo com Coury [7], a linha de transmissão é o elemento do sistema elétrico mais vulnerável a faltas, principalmente pela sua dimensão física, visto que, a linha fica exposta a vários fatores como descargas atmosféricas, queimadas, entre outros. A Tabela 2.1 mostra o número de faltas ocorridas por setores em um SEP real durante um período de 10 anos.

Entende-se por falta em linhas de transmissão como sendo uma falha total ou parcial na continuidade do fornecimento de energia elétrica. A ocorrência de uma falta pode ser um fenômeno interno ou externo ao sistema. As faltas podem ser do tipo permanente ou intermitentes. As faltas permanentes, são do tipo irreversíveis,



Figura 2.2: Torre de uma linha de transmissão. Fonte: <http://newserrado.com/2009/11/11/seguranca-nacional-e-o-apagao>.

Tabela 2.1: Ocorrência de faltas no SEP em um sistema de  $500\text{ kV}$ , num período de 10 anos.

<b>Setor do sistema elétrico</b>	<b>Número de faltas</b>
Linhas de transmissão	82
Circuitos disjuntores	4
Autotransformadores	6
Barramentos	1
Geradores	1
Falha humana	5

ou seja, após a abertura do disjuntor, a continuidade do fornecimento de energia não poderá ser restabelecido. As faltas intermitentes são aquelas que ocorrem sem haver danos físicos ao sistema, ou seja, após a atuação da proteção, o sistema poderá ser restabelecido sem problemas [7].

De acordo com Tleis [27] dois tipos de faltas podem ocorrer em um sistema: curto-circuito e circuito aberto. Faltas tipo curto-circuito podem ocorrer entre fases, entre fases e terra ou os dois ao mesmo tempo. As faltas tipo circuito aberto podem ocorrer em uma fase ou duas fases ao mesmo tempo.

Faltas tipo curto-circuito podem ser causadas por fatores meteorológicos como, descargas atmosféricas, chuva torrenciais, ventos fortes, ou ainda por outros fatores como poluição depositada em isoladores, inundações e incêndios debaixo de linhas de transmissão, contato com árvores, vandalismos, acidentes com veículos, entre outros. Faltas tipo circuito aberto podem ser causadas por falhas em junções de cabos ou falha em um dispositivo de proteção instalado na linha, como por exemplo, um disjuntor. Em faltas entre fases, a falta ocorre devido a um arco elétrico entre dois condutores de alta-tensão, enquanto que para faltas entre fases e terra, a falta será devido a um arco elétrico entre o condutor de alta-tensão e um objeto aterrado, como a própria torre em si [16].

Em linhas de transmissão, as faltas tipo curto-circuito e circuito aberto são classificadas como:

- fase-fase (*line-line* - LL);
- fase-fase-fase (trifásica) (*line-line-line* - LLL);
- fase-terra (*line-ground* - LG);
- fase-fase-terra (*line-line-ground* - LLG);
- fase aberta (*line-open* - LO);
- fase-fase aberta (*line-line-open* - LLO).

A falta do tipo trifásica que afeta simetricamente as três fases do circuito trifásico é dita balanceada, enquanto todos os outros tipos de falta são não-balanceadas. Faltas simultâneas são uma combinação de dois ou mais tipos de faltas que ocorrem ao mesmo tempo. Elas podem ser de tipos iguais ou diferentes e também ocorrer no mesmo local ou em locais diferentes. Por exemplo, um condutor de fase que cai ao solo é, simultaneamente, uma falta tipo curto-circuito e tipo circuito-aberto. Faltas em uma fase podem afetar as outras fases que estão normais, causando perturbações. A maioria das faltas não muda de tipo durante o período de ocorrência da falta, mas algumas faltas podem evoluir de uma falta tipo fase-terra para uma falta tipo fase-fase-terra, por exemplo. Isso pode ocorrer em linhas de transmissão aéreas onde o arco elétrico do curto-circuito propaga para as outras fases normais [27].

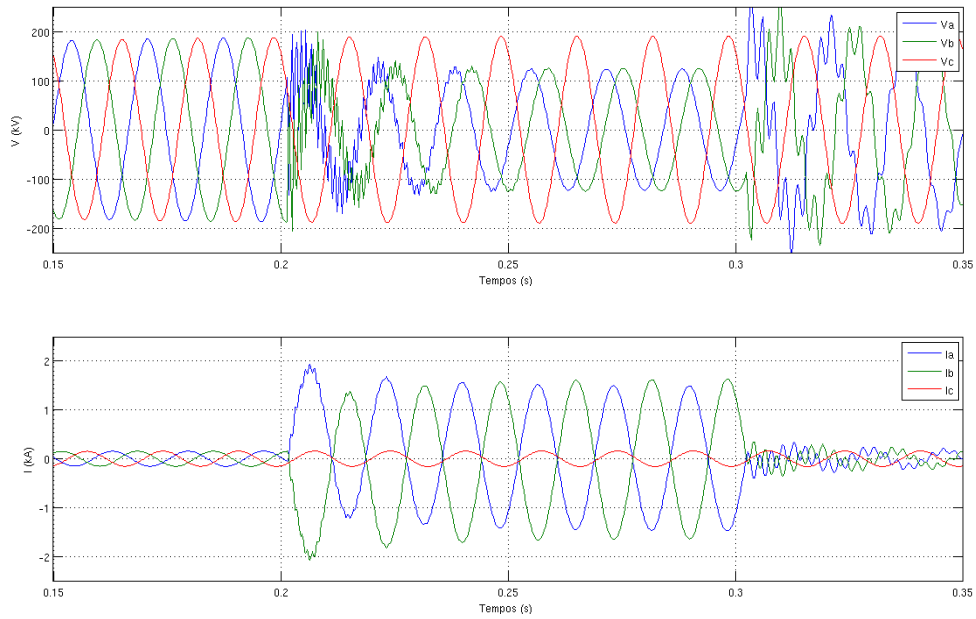


Figura 2.3: Falta simulada tipo curto-circuito - fase AB.

As Figuras 2.3 a 2.11 apresentam exemplos de faltas tipo curto-circuito e circuito aberto. Os sinais trifásicos de tensão ( $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$ ) e corrente ( $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$ ) são resultantes de faltas obtidas via simulação em software de um SEP. Mais detalhes sobre a base simulada são apresentados no Capítulo 5. As faltas foram provocado no intervalo de tempo entre 0.2 e 0.3 segundos.

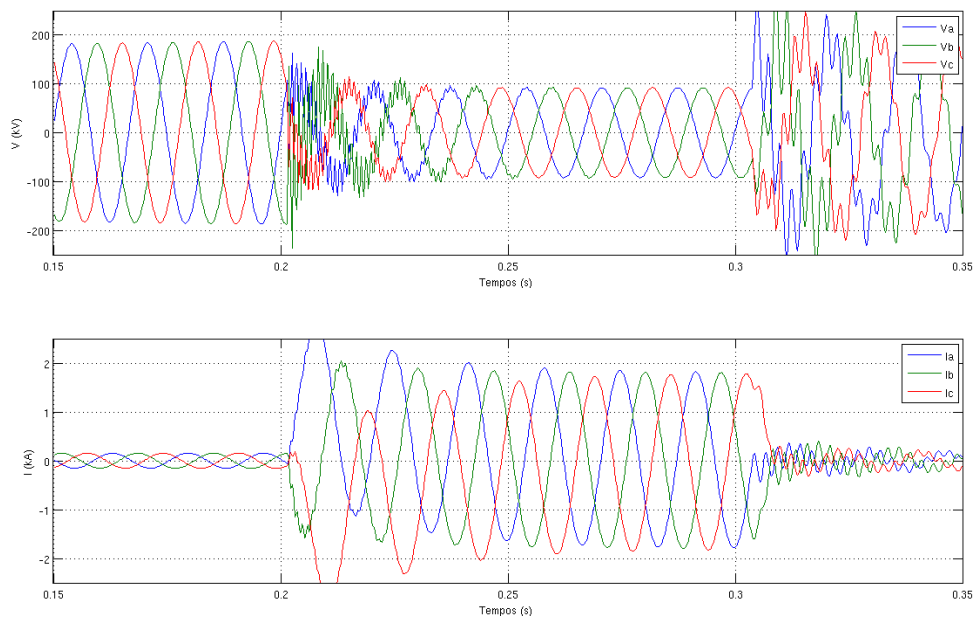


Figura 2.4: Falta simulada tipo curto-circuito - fase ABC.

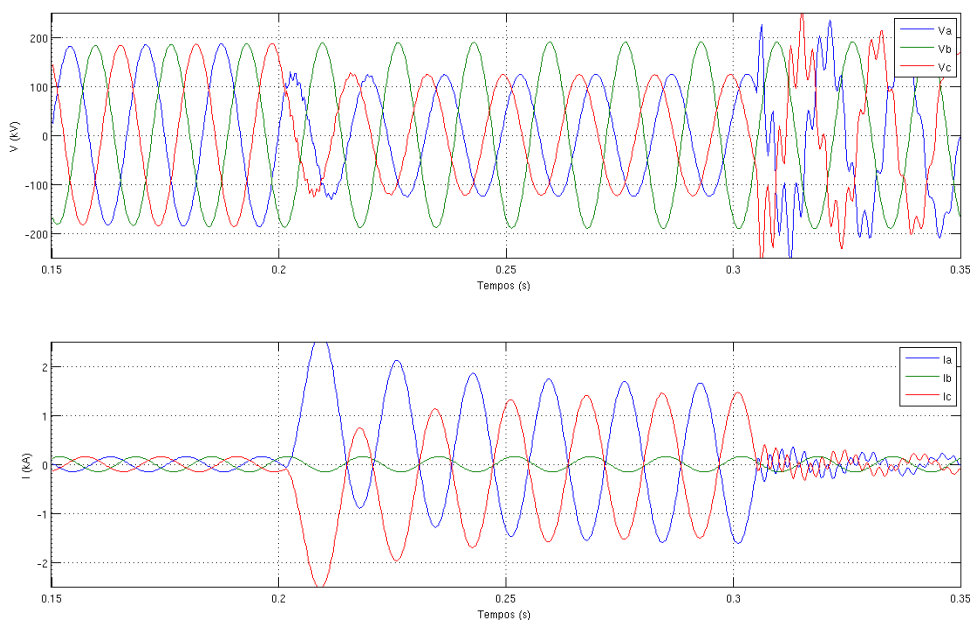


Figura 2.5: Falta simulada tipo curto-circuito - fase AC.

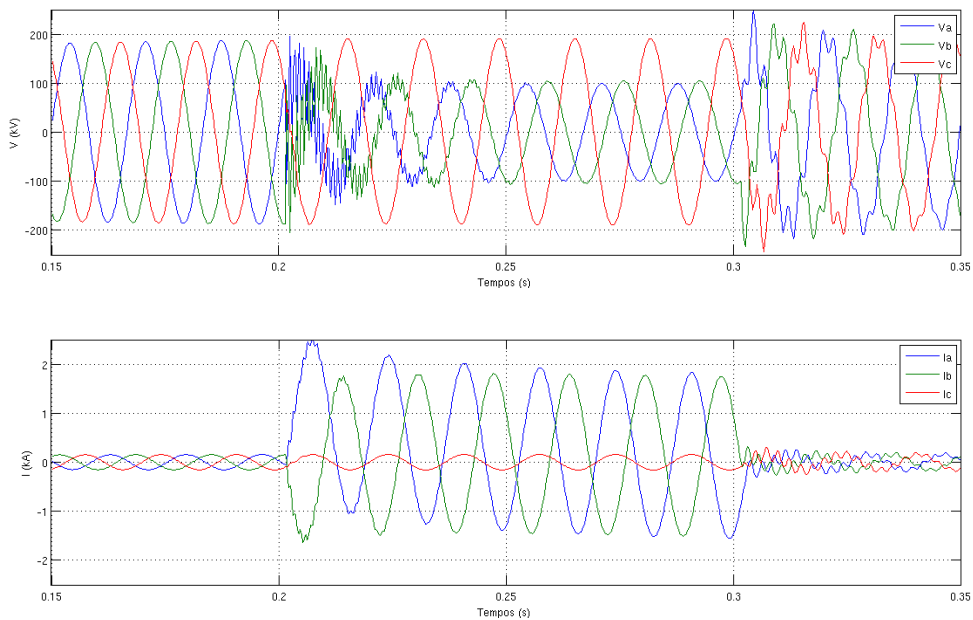


Figura 2.6: Falta simulada tipo curto-circuito - fase ABG.

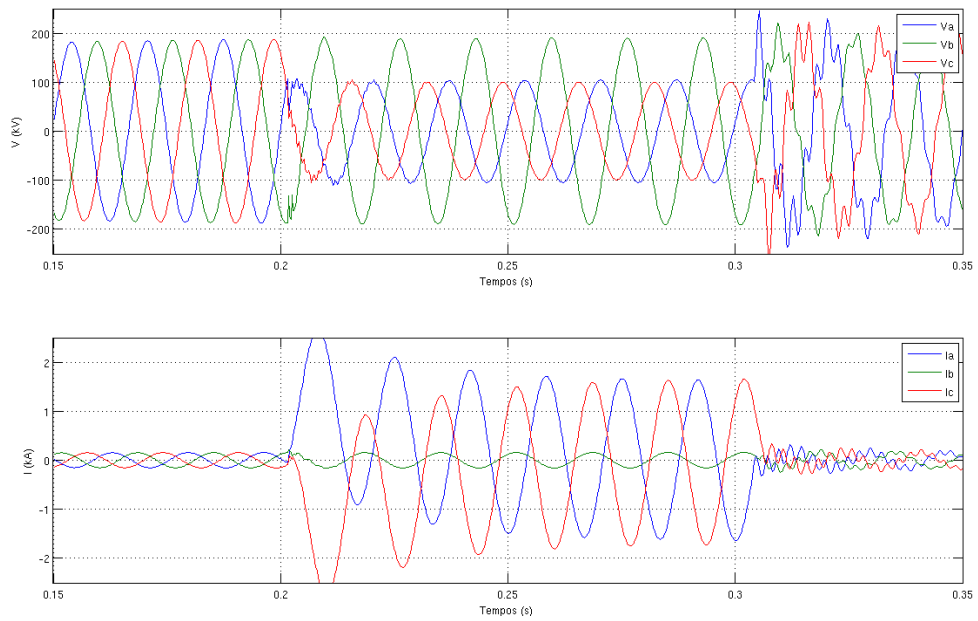


Figura 2.7: Falta simulada tipo curto-circuito - fase ACG.

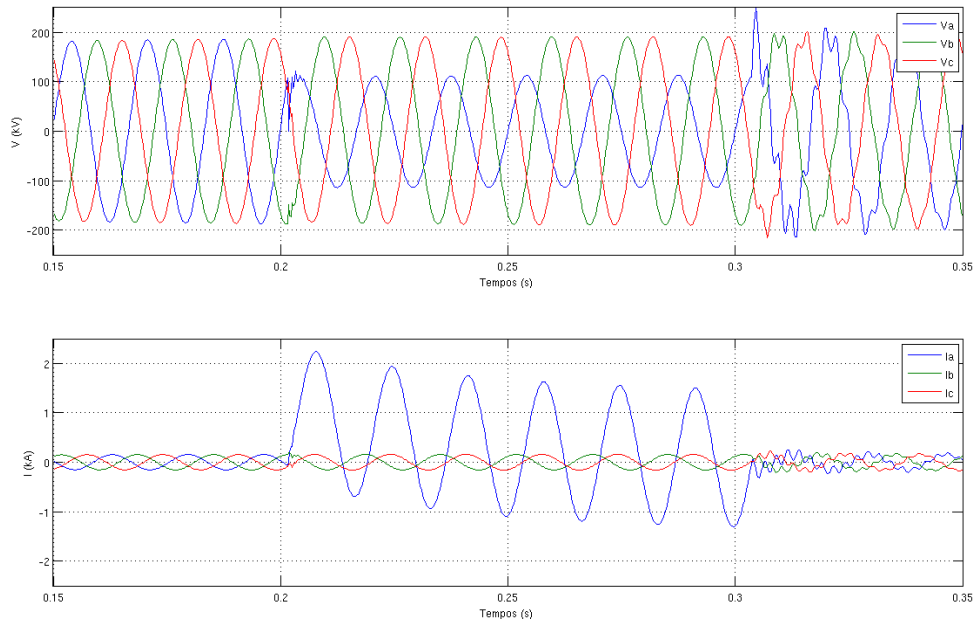


Figura 2.8: Falta simulada tipo curto-circuito - fase AG.

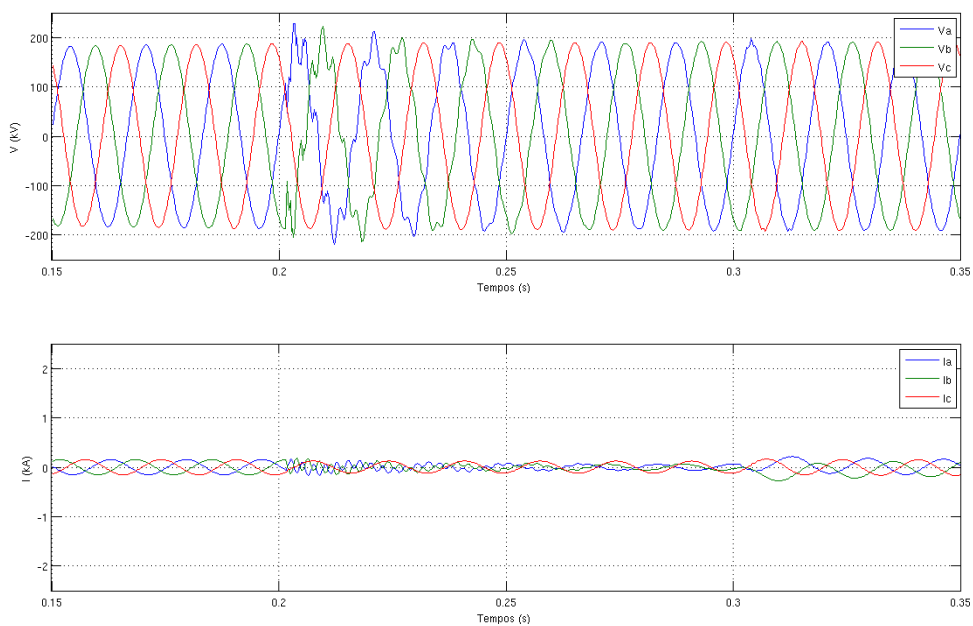


Figura 2.9: Falta simulada tipo circuito aberto - fase ABO.

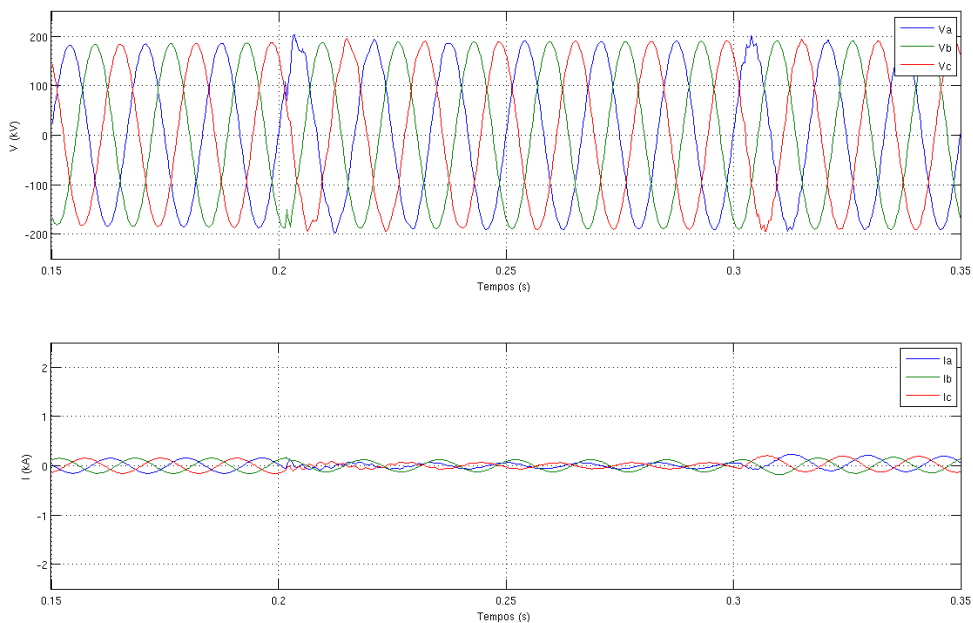


Figura 2.10: Falta simulada tipo circuito aberto - fase ACO.

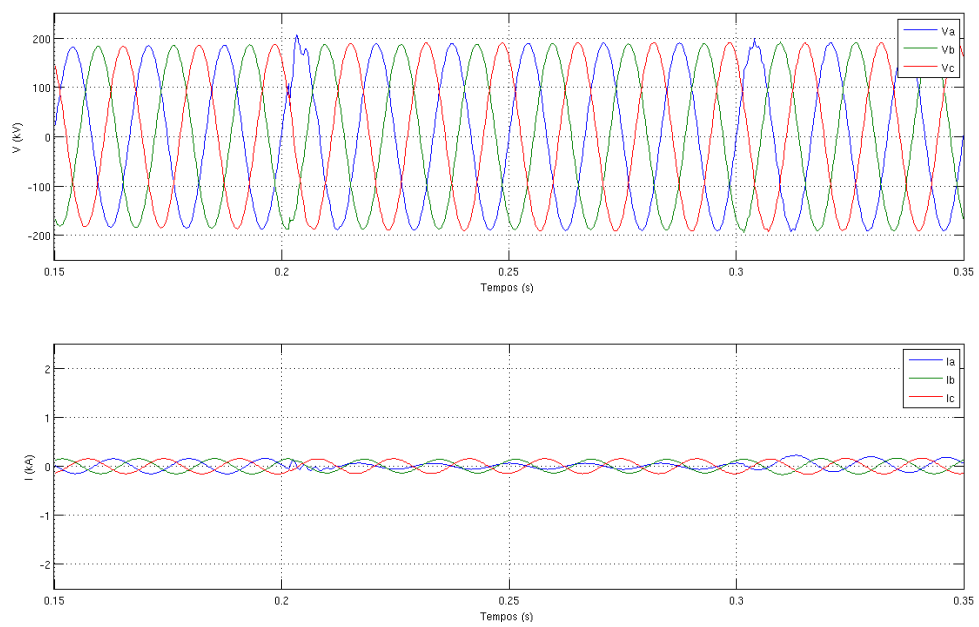


Figura 2.11: Falta simulada tipo circuito aberto - fase AO.

# Capítulo 3

## Diagnóstico de Falhas

Os SEPs estão sujeitos a diversas perturbações provocadas por acréscimos de cargas, faltas ocasionadas por fontes naturais, falhas de equipamentos, etc. É de grande importância para os SEPs identificar a falta ocorrida e restaurar o sistema no menor tempo possível e da melhor forma possível. Tem sido propostos na literatura diversos trabalhos a fim de detectar, classificar e localizar os vários tipos de faltas que ocorrem nos SEPs.

As técnicas propostas para o diagnóstico de faltas podem ser divididos em 3 grupos: métodos convencionais, métodos baseados em análise de sinais e métodos baseados em sistemas inteligentes. Os métodos convencionais utilizam das mudanças de parâmetros da linha de transmissão para a tomada de decisão sobre a ocorrência da falta, tais como, impedância e magnitude dos sinais de corrente e tensão. Os métodos baseados em análise de sinais utilizam de ferramentas como Transformada de *Fourier* ou a Transformada Wavelet para extrair informações de frequência dos transitórios dos sinais de corrente e tensão para a detecção das faltas. Os métodos baseados em sistemas inteligentes adotam as informações extraídas da linha de transmissão, como os coeficientes de detalhe obtidos pela Transformada Wavelet, como atributos para diferentes sistemas inteligentes capazes de detectar e classificar os diversos tipos de faltas envolvidas [16].

Detecção e classificação de faltas são duas das tarefas mais importantes envolvidas na proteção de linhas de transmissão. Elas devem ser cumpridas de forma rápida e precisa para que o sistema possa ser corrigido e restaurado [15]. Neste capítulo, será apresentada uma revisão de literatura contendo diferentes abordagens de trabalhos que propuseram estratégias para diagnósticos de faltas, restringindo o estudo aos métodos baseados em sistemas inteligentes para detecção e classificação de faltas, por ser o foco dessa dissertação.

### 3.1 Métodos baseados em sistemas inteligentes

Uma condição transitória em linha de transmissão ocorre quando a linha é sujeita a algum tipo de falta, dando origem a presença de correntes harmônicas. Transformações desses sinais de falta são realizadas para extrair informações sobre esses harmônicos. Nos últimos anos, vários métodos de detecção e classificação de faltas têm sido propostos. Estes métodos são baseados em Redes Neurais Artificiais (RNAs), Transformada de *Fourier*, Transformada Wavelet, ou uma combinação dessas técnicas. As transformadas de Fourier e Wavelet são duas das principais ferramentas utilizadas para análise no domínio da frequência de qualquer sinal [1].

Embora a Transformada Wavelet apresente um bom desempenho na análise de transitórios, existem vários problemas em aberto para serem resolvidos. Em muitas aplicações os resultados de uma Transformada Wavelet contêm um grande número de dados que necessitam de tratamento posterior. Dificultando, desta forma, a etapa de detecção e classificação de faltas [15]. Desta forma os sistemas inteligentes se tornaram indispensáveis para essa tarefa.

Atualmente, têm sido propostos métodos inteligentes baseados em RNA [14], Lógica *Fuzzy* [33], e Redes *Neurofuzzy* [18]. Sendo que, trabalhos recentes tem utilizado a Transformada Wavelet como ferramenta para extração dos atributos dos sinais de tensão e corrente como entrada para esses classificadores [16].

O presente trabalho tem como referência principal a dissertação desenvolvida por Inácio [16]. Em Inácio [16] é utilizada a Transformada Wavelet para extração de padrões dos sinais e uma rede lógica *neurofuzzy* com aprendizado participativo para a classificação de faltas em linhas de transmissão. As faltas foram simuladas sob diferentes condições de resistência da falta, distância da falta, ângulo de incidência da falta e ângulo de carga do sistema. A detecção das faltas é realizada a partir dos coeficientes de frequência obtidos utilizando uma wavelet *daubechies 4 (db4)* através do nível de decomposição *D1* dos sinais de tensão e corrente. Esses coeficientes são comparados com um limiar para decidir a ocorrência ou não da falta como mostrado na Figura 3.1. Ao detectar uma falta as amostras dos sinais no período da falta são usados como entradas para a rede *neurofuzzy* com aprendizado participativo. A base de dados simulada será a mesma utilizada neste trabalho e um comparativo dos resultados das metodologias propostas será apresentado.

Em Inácio [16] foi realizado uma revisão da literatura sobre importantes trabalhos realizados utilizando sistemas inteligentes, dentre esses, destacam-se os

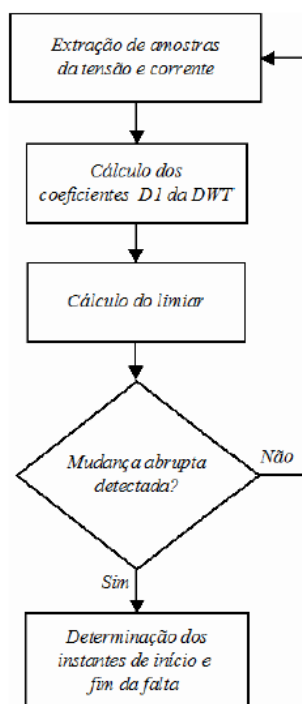


Figura 3.1: Fluxograma do algoritmo proposto para detecção de faltas em linhas de transmissão [16].

trabalhos de Vázquez et al. [30], Fernandez & Ghonaim [10] e Das & Reddy [8]. Em Vázquez et al. [30] foi proposto o uso de uma RNA tipo *Multilayer Perceptron* (MLP) com padrões de entrada da rede formados por sinais de corrente extraídos da linha, após passar por um filtro *anti-aliasing*. No trabalho de Fernandez & Ghonaim [10] foi proposto o uso de uma RNA tipo *Finite Impulse Response Artificial Neural Network* (FIRANN) utilizando sinais de tensão, ( $V_a, V_b$  e  $V_c$ ), corrente, ( $I_a, I_b$  e  $I_c$ ) e um somatório dos sinais de correntes ( $I_a + I_b + I_c$ ) extraídos da linha de transmissão como padrões de entrada para a RNA. O trabalho Das & Reddy [8] apresenta um método para classificação de faltas em linhas de transmissão baseado em lógica *fuzzy* propondo um algoritmo de classificação que emprega a diferença angular entre as componentes de sequência das correntes de falta,  $ang\_A$ ,  $ang\_B$  e  $ang\_C$ , e as magnitudes,  $R_{0f}$  e  $R_{2f}$ , como informações sobre a falta. Para realizar a classificação, os autores utilizaram um Sistema de Inferência Fuzzy (*Fuzzy Inference Systems - FIS*).

Nos trabalhos analisados que utilizam sistemas inteligentes, destaca-se o uso de amostras dos sinais em falta como padrão de entrada para os classificadores [21], [23], e das componentes de frequência dos sinais de tensão e correntes através de Transformada de *Fourier* [11], e Transformada Wavelet [6], [32].

Os resultados, tanto para trabalhos que utilizam RNAs, quanto lógica *fuzzy* para diagnóstico de faltas em linhas de transmissão, mostram que esses métodos atingem desempenhos iguais ou superiores a outros métodos propostos. As principais vantagens do uso de RNAs para diagnóstico de faltas em relação a outros métodos são a alta precisão, a alta velocidade de resposta e a capacidade de aprendizado e generalização das RNAs. A lógica *fuzzy* tem como vantagem a capacidade de lidar com a incerteza proporcionada pela variação dos parâmetros da linha de transmissão, pela menor complexidade de implementação e baixo custo computacional [16].

## 3.2 Trabalhos recentes sobre detecção e classificação de faltas

Um breve resumo de alguns dos trabalhos mais recentes relacionados a tarefa de detecção e classificação de faltas em linhas de transmissão é apresentado.

No trabalho de Abdollahi & Seyedtabaai [1] é apresentada uma comparação das técnicas Transformada de *Fourier* e Transformada Wavelet na extração de padrões para detecção e classificação de faltas em linhas de transmissão. Um sistema elétrico foi simulado usando o PSCAD e tipos de faltas com diferentes condições do sistema foram modeladas. As faltas são classificadas como Faltas Balanceadas, LLL, ou Faltas Desbalanceadas, LG, LLG e LL. Para quatro conjuntos de dados de correntes amostradas, *faseA*, *faseB*, *faseC* e corrente de sequência zero, foram aplicadas a Transformada de *Fourier* Discreta (*Discrete Fourier Transform* - DFT) e a Transformada Wavelet Discreta (*Discrete Wavelet Transform* - DWT) de nível 3. Na classificação foi utilizada uma RNA tipo MLP para as quatro entradas resultantes das transformadas. Três funções diferentes de RNAs foram implementadas e comparadas, *Feed-Forward Back-Propagation*, *Radial Basis Network* e *Elman Back-Propagation Network*, tendo melhores resultados a RNA *Feed-Forward Back-Propagation*. De acordo com os resultados, os métodos apresentaram resultados satisfatórios para detecção e classificação de faltas. No entanto, DWT apresentou melhores resultados. No pior caso a DFT apresentou 13% de erro e a DWT 8% de erro na classificação, sendo que, a DFT não conseguiu detectar 100% das faltas, ao contrário da DWT.

He et al. [15] apresenta uma nova técnica para detecção e classificação de faltas em linhas de transmissão de alta tensão utilizando as componentes faltas. A

*Wavelet Singular Entropy* (WSE) é utilizada para extrair as características dos sinais de faltas. Segundo a referência, a Transformada Wavelet tem bom desempenho, mas ainda apresenta limitações sendo necessário tratamento de alguns dados após a transformação para facilitar a tarefa de detecção e classificação de faltas. O método WSE é assim chamado por combinar as técnicas de Transformada Wavelet, decomposição em valores singulares (*Singular Value Decomposition* - SVD) e entropia de *Shannon*. A partir dos dados de amostras dos sinais de tensão e corrente é gerada uma matriz de coeficientes utilizando uma wavelet *db4* com 4 escalas de decomposição do sinal. Em seguida, a matriz é decomposta pela técnica SVD obtendo um vetor de valores singulares para o cálculo da entropia. Para a simulação foi utilizado uma linha de transmissão de 500 *kV* e 300 *km* de comprimento, simulada no software PSCAD. A falta é detectada quando a WSE atinge um certo limiar, assim como na maioria dos métodos que utilizam Transformada Wavelet. A classificação é realizada a partir dos valores da WSE. A estratégia de classificação foi comparado com dois métodos baseados na Transformada Wavelet, *Wavelet Modulus Maxima* (WMM) e *Wavelet Energy* (WE), e mostrou-se superior na acurácia da classificação das faltas.

No trabalho de Upendar et al. [28] a classificação de faltas é realizada por uma RNA juntamente com *Particle Swarm Optimisation* (PSO), usado no treinamento da rede. A Transformada Wavelet é aplicada aos sinais de corrente pós-falta e os coeficientes de detalhe em vários níveis foram usados como entrada para o classificador. A RNA utilizada foi do tipo MLP e toda a metodologia foi simulada no software MATLAB. Segundo os autores a utilização do PSO para o treinamento da rede com Transformada Wavelet promoveu estimativa confiável e rápida para os tipos de faltas. Em uma comparação entre PSO-RNA, RNA *back-propagation* e *Support Vector Machine* (SVM), foi mostrado que, com a utilização do PSO no treinamento da RNA, a acurácia da classificação apresentou um desempenho ligeiramente superior aos outros classificadores.

Zhu & Sun [34] apresentaram um método baseado na WSE e no sistema de reconhecimento imunológico artificial (*Artificial Immune Recognition System* - AIRS) para classificação de faltas em linhas de transmissão. Segundo autores, com o uso do AIRS é possível desenvolver sistemas capazes de executar ampla gama de tarefas em várias áreas de pesquisa com características de auto-aprendizado, auto-organização, tolerância a ruído e capacidade de memória, sendo amplamente usados na otimização e classificação. A WSE é usada para quantificar a incerteza das tensões transitórias das faltas de alta frequência, assim como, refletir e iden-

tificar vários estados de faltas do sistema elétrico. Inicialmente, os sinais de tensão trifásica são decompostos em várias componentes através do método *wavelet packet* - uma generalização da Transformada Wavelet. Em seguida, uma matriz de autovetores é formada através de várias componentes de cada fase e a extração da entropia singular é considerada como um caracterizador de falta, visto que, quanto menor o ruído no sinal menor é a sua entropia singular e quanto maior o ruído maior a entropia singular, ou seja, a WSE do sinal de fase em falta é maior do que a WSE do sinal sem falta. Para a tarefa de classificação é construído um classificador baseado no AIRS. O algoritmo passa pelas etapas de clonagem e mutação até que se tenha um conjunto representativo de células denominadas Células de Memória. O software MATLAB foi utilizado para a demonstração do método através da construção de uma linha de transmissão de 300 km e tensão de 500 kV. A geração dos sinais de faltas foram do tipo falta entre fases e falta entre fase e terra. Segundo os resultados apresentados, para 1440 padrões de faltas, o AIRS teve uma acurácia superior ao SVM e RNA *Back-Propagation*, também implementados para comparação.

No trabalho de Chiradeja & Ngaopitakkul [6] é apresentado uma técnica para classificação de faltas em linhas de transmissão baseada na DWT e RNA. Os padrões de entrada para a RNA são obtidos pela decomposição dos sinais através de uma wavelet *db4* obtendo as componentes de altas frequências. Segundo autores, a Transformada Wavelet é muito eficaz na detecção de sinais transitórios das faltas, mas pode não ser suficiente para a caracterização completa. As faltas foram geradas através do *Alternative Transients Program/Electromagnetic Transients Program* (ATP/EMTP) com a simulação de uma linha de transmissão de 500 kV. Os tipos de faltas considerados foram: LG, LLG, LL e LLL. Foram comparadas as RNAs *Back-propagation* e *Radial Basis Function* (RBF) para a tarefa de classificação, mostrando uma melhor acurácia da RBF com um menor tempo de treinamento.

No trabalho de Bhowmik et al. [2] é usada a DWT, Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT) e uma RNA *back-propagation* para classificação e localização de faltas em linhas de transmissão. As faltas simuladas no ATP/EMTP foram do tipo fase-terra, fase-fase, fase-fase-fase. A wavelet *daubechies 3* (*db3*) foi escolhida por apresentar melhor desempenho. As entradas para a RNA foram formadas pelos valores máximo e mínimo dos coeficientes de detalhe de nível 3 obtidos com a DWT e pelo valor de frequência dominante presente na DWT obtido por meio da recomposição do sinal utilizando FFT. A desvantagem da abordagem proposta é pelo fato de não identificar em quais das fases (fase-A, fase-B ou fase-C) ocorreram as faltas.

No trabalho de Dong et al. [9] um algoritmo para a classificação de faltas e seleção das fases em falta com base na onda viajante inicial da corrente é apresentado. A Transformada Wavelet foi utilizada pra extrair as ondas viajantes dos sinais de pós-falta. O desempenho do algoritmo foi verificado a partir de faltas simuladas através do ATP/EMTP. Segundo autores, os algoritmos baseados nas ondas viajantes das faltas tem sido amplamente investigado em muitos estudos e podem prover informações para classificação e seleção da fase em falta.

No trabalho de Valsan & Swarup [29] é apresentado um esquema completo de diagnóstico de faltas com detecção, classificação e localização. A Transformada Wavelet é usada para extrair informações dos transitórios de faltas sendo usado apenas o primeiro nível de detalhe da frequência dos sinais de tensão e corrente. A detecção e classificação das faltas é feita através da análise do primeiro nível de alta frequência do sinal, obtido pela por uma wavelet *daubechies 6 (db6)* e de limiares estabelecidos. O sistema de potências foi modelado no ATP/EMTP onde várias condições de faltas foram simuladas.

No trabalho de Ling et al. [20] é proposto um algoritmo para classificação de faltas em linhas de transmissão de alta tensão (*Extra High Voltage* - EHV). A extração de características dos sinais de faltas é realizada pela medida da informação de entropia e da entropia aproximada, que é parte da medida de complexidade, obtendo os parâmetros  $M_a$ ,  $M_b$  e  $M_c$  e  $N_a$ ,  $N_b$  e  $N_c$  respectivamente, onde  $a$ ,  $b$  e  $c$  indicam as fases da linha de transmissão trifásica. A medida da informação foi realizada na pré-falta e pós-falta. Foi utilizada uma linha de transmissão de 500 kV para as simulações.

No trabalho de Malathi & Marimuthu [22] é abordado o uso do algoritmo SVM para classificar diferentes tipos de faltas em uma linha de transmissão. A base de dados foi gerada com diferentes tipos de faltas e condições, como: variação da resistência da falta, variação da distância da falta e variação do ângulo de incidência da falta. As faltas foram simulada foram do tipo: LG, LL, LLG, LLL, e LLLG. A wavelet mãe *daubechies 5 (db5)* foi utilizada para a extração de padrões dos sinais pós falta utilizados como entrada para o SVM com kernel RBF. O método mostrou resultados satisfatórios, assim como outros trabalhos que utilizada da decomposição wavelet para extração de informação.

Neste capítulo foi apresentado o estado da arte para a tarefa de detecção e classificação de faltas em linhas de transmissão destacando as principais estratégias utilizadas para cada etapa. Entre os trabalhos avaliados, a análise de sinais

utilizando Transformada Wavelet para extrair informações de frequência dos transitórios é amplamente adotada por apresentar os melhores resultados. Os padrões extraídos dos sinais de tensão e corrente das faltas pela transformada são usado como entradas para diversos tipos de classificadores baseados em RNA, Lógica *Fuzzy*, Redes *Neurofuzzy*, AIRS, SVM entre outros. Sendo mais predominante o uso de RNA na etapa de classificação.

# Capítulo 4

## Metodologia

Objetivando desenvolver uma estratégia para diagnóstico de faltas em linhas de transmissão, neste capítulo é apresentada uma nova proposta para a modelagem matemática do comportamento, sob condições normais de operação, de cada fase de uma linha de transmissão e as estratégias de detecção e classificação de faltas utilizando esse modelo.

### 4.1 Introdução

A transmissão de energia elétrica é o mecanismo de transporte de energia eletromagnética dos sistemas elétricos de potência para as unidades consumidoras. Esse transporte é realizado por linhas de transmissão que normalmente utilizam do sistema trifásico por ser a forma mais comum de transporte de energia em corrente alternada. O sistema trifásico, é formado pelas fases *A*, *B* e *C*, com as respectivas tensões  $V_a$ ,  $V_b$  e  $V_c$  e correntes induzidas  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$ , conforme apresentado na Figura 4.1. As tensões e correntes apresentam um comportamento senoidal e as fases são defasadas entre si, por um ângulo de 120 graus, tornando o sistema balanceado [24].

Matematicamente, a forma de onda senoidal da tensão e corrente é descrita como:

$$V_{(t)} = V_o \cdot \sin(\omega t + \theta_V)$$

$$I_{(t)} = I_o \cdot \sin(\omega t + \theta_I)$$

Onde:

- $V(t)$  caracteriza o comportamento instantâneo da tensão no domínio do tempo.
- $I(t)$  caracteriza o comportamento instantâneo da corrente no domínio do tempo.
- $V_o$  é a amplitude da tensão (valor de pico).
- $I_o$  é a amplitude da corrente (valor de pico).
- $\omega$  é a frequência angular, em radianos por segundo.
- $t$  é o tempo, em segundos.
- $\theta_V$  e  $\theta_I$  são os ângulos de fase (em radianos) em relação à origem ( $t = 0$ ) da tensão e corrente, respectivamente.

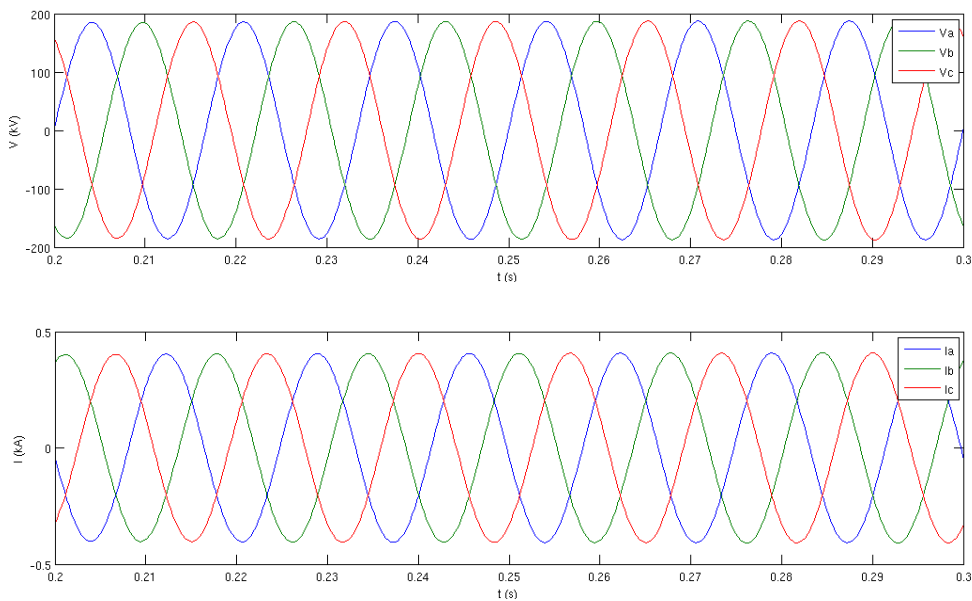


Figura 4.1: Forma de onda da tensão e corrente em um sistema trifásico, sob condições nominais.

As constantes  $V_o$  e  $I_o$ , representam valores nominais e podem ser obtidas a partir dos valores eficazes de tensão e corrente,  $V_o = V_{ef} \cdot \sqrt{2}$  e  $I_o = I_{ef} \cdot \sqrt{2}$ .

Define-se a menor parte que não se repete de uma forma de onda periódica como o ciclo. O tempo de duração de um ciclo é o período ou  $T$ . A frequência  $f$  de uma onda no Sistema Internacional de Unidades (SI) é dada por *hertz* ( $Hz$ ) e definida pelo inverso do período  $T$ .

$$f = \frac{1}{T}$$

No sistema elétrico brasileiro a frequência utilizada é de  $60Hz$ . A frequência  $f$  e a frequência angular  $\omega$  estão relacionados por:

$$\omega = 2\pi f$$

Assumindo a tensão como a forma de onda de referência, a relação entre as formas de onda da tensão e corrente, em uma mesma fase de uma linha de transmissão, podem ser expressas na forma:

$$X''_{(t)} = V_o \cdot \sin(\omega t) \quad (4.1)$$

$$Y''_{(t)} = I_o \cdot \sin(\omega t - \varphi) \quad (4.2)$$

O ângulo de defasagem,  $\varphi$ , representa a defasagem do sinal da corrente  $Y''$  em relação ao sinal da tensão  $X''$  na fase de interesse. O sinal negativo do ângulo mostra que a corrente está atrasada em relação a tensão em um mesmo instante  $t$ . Em um sistema elétrico,  $\cos(\varphi)$  representa o fator de potência (FP). Para qualquer sistema elétrico, o FP é definido como a relação entre a potência ativa (P) e a potência aparente (S) presentes no sistema elétrico, Figura 4.2.

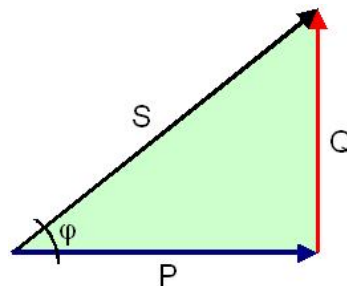


Figura 4.2: Triângulo representando a relação das potências aparente (S), ativa (P) e reativa (Q).

Os valores instantâneos da tensão e corrente podem ainda ser projetados em um espaço bidimensional. O comportamento geométrico de uma fase de uma linha de transmissão em operação nominal (sem ruído), considerando um sistema operando com os seguintes valores de pico,  $V_o = 200kV$  e  $I_o = 0.4kA$ , pode ser visto na Figura 4.3, para diferentes valores de fatores de potência. O comportamento no espaço bidimensional pode ser caracterizado como uma secção cônica do tipo elipse. Considerando todas as fases de um mesmo sistema trifásico em operação nas condições normais, o comportamento elíptico é semelhante, visto que,

os valores de pico e ângulo de defasagem entre os sinais são idênticos para cada fase.

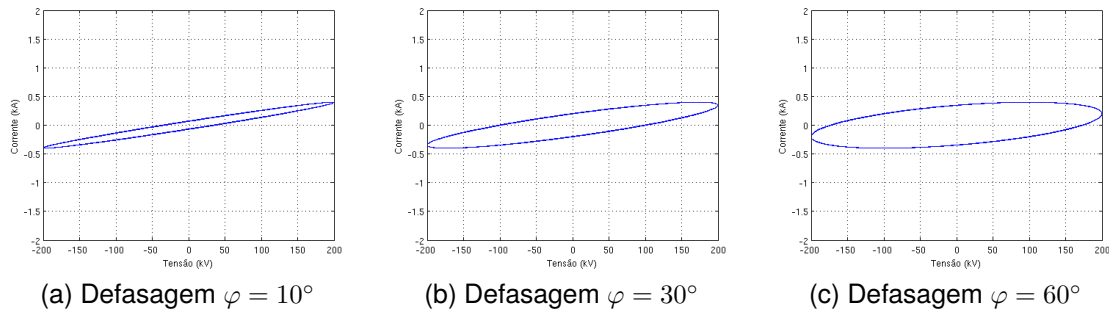


Figura 4.3: Comportamentos elípticos de uma fase da linha de transmissão para valores diferentes de fator de potência.

A variação no fator de potência do sistema provoca mudanças na geometria da elipse alterando o tamanho dos raios e ângulo de rotação da elipse em relação ao eixo das abcissas. A Figura 4.4 mostra o comportamento elíptico para diferentes valores de pico da corrente e fator de potência fixo com  $\varphi = 10^\circ$ . Variações nos valores de pico também provocam alterações no tamanho dos raios e no ângulo de rotação da elipse em relação ao eixo das abcissas. Desta forma, é mostrado que qualquer alteração nos parâmetros do sistema elétrico irá provocar alterações no comportamento funcional da fase, definido por uma elipse.

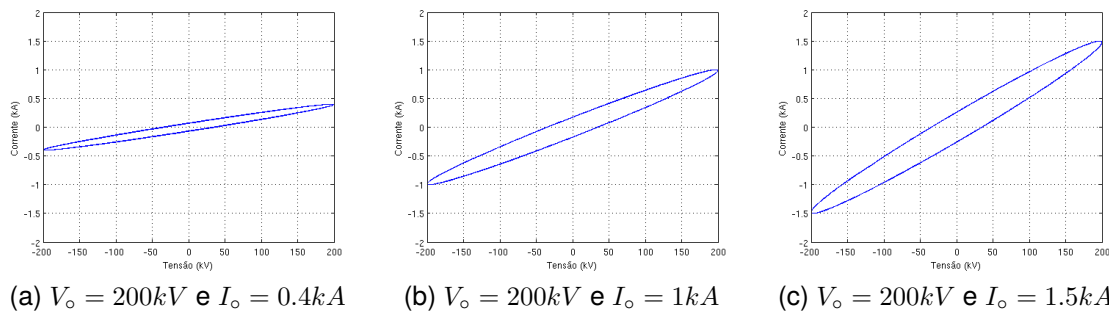


Figura 4.4: Comportamentos elípticos de uma fase da linha de transmissão para diferentes valores de pico da corrente.

Na seção seguinte é apresentada a formulação matemática para a expressão da elipse, formada pelo sinal da tensão e corrente, para cada fase de uma linha de transmissão através das equações 4.1 e 4.2.

## 4.2 Representação geométrica do comportamento de uma linha de transmissão

Conhecido os valores nominais de pico, os sinais de tensão e corrente podem ser apropriadamente padronizados, tornando o valor de pico do sinal igual a 1:

$$X'_{(t)} = \frac{X''_{(t)}}{V_o} = \sin(\omega t) \quad (4.3)$$

$$Y'_{(t)} = \frac{Y''_{(t)}}{I_o} = \sin(\omega t - \varphi) \quad (4.4)$$

Utilizando relações trigonométricas, o sinal padronizado da corrente,  $Y'$ , pode ser reescrito como:

$$Y'_{(t)} = \sin(\omega t) \cdot \cos(\varphi) - \cos(\omega t) \cdot \sin(\varphi) \quad (4.5)$$

Substituindo a Equação (4.3) na Equação (4.5), tem-se:

$$Y'_{(t)} = X'_{(t)} \cdot \cos(\varphi) - \cos(\omega t) \cdot \sin(\varphi) \quad (4.6)$$

Logo, a partir das Equações (4.3) e (4.6) pode-se afirmar que:

$$\sin(\omega t) = X'_{(t)} \quad (4.7)$$

$$\cos(\omega t) = \frac{X'_{(t)} \cdot \cos(\varphi) - Y'_{(t)}}{\sin(\varphi)} \quad (4.8)$$

É conhecido, pelas identidades trigonométricas, que:

$$\sin(\omega t)^2 + \cos(\omega t)^2 = 1 \quad (4.9)$$

Realizando as substituições na Equação (4.9) é obtida a equação da secção cônica que representa o comportamento do sistema elétrico, para cada fase padronizada, operando nas condições nominais:

$$X'^2_{(t)} - 2 \cos(\varphi) X'_{(t)} Y'_{(t)} + Y'^2_{(t)} - \sin(\varphi)^2 = 0 \quad (4.10)$$

A padronização dos valores de pico da tensão e corrente é importante para que sinais de diferentes amplitudes máximas possam ser analisados em uma mesma escala no processo de diagnóstico de faltas. A equação para um valor qualquer de  $V_o$  e  $I_o$ , também será importante no decorrer deste trabalho e é obtida na forma:

$$V_o^2 X''_{(t)} - 2V_o I_o \cos(\varphi) X''_{(t)} Y''_{(t)} + I_o^2 Y''_{(t)} - V_o^2 I_o^2 \sin(\varphi)^2 = 0 \quad (4.11)$$

De acordo com Boldrini et al. [3], uma seção cônica em  $R^2$  é um conjunto de pontos cujas coordenadas em relação à base canônica satisfazem a equação geral:

$$ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0$$

com  $a$  ou  $b$  ou  $c \neq 0$ .

- Se  $b \neq 0$ , a seção cônica está rotacionada em relação aos eixos do plano cartesiano pela presença do termo  $xy$ .
- Se  $d \neq 0$  e/ou  $e \neq 0$ , indica uma translação do centro da seção cônica em relação a origem do plano cartesiano.

A cônica definida na Equação (4.10), para os sinais padronizados, têm a forma geral dada por:

$$A' X'_{(t)} + B' X'_{(t)} Y'_{(t)} + C' Y'_{(t)} + D' X'_{(t)} + E' Y'_{(t)} + F' = 0 \quad (4.12)$$

onde  $A' = 1$ ,  $B' = -2 \cos(\varphi)$ ,  $C' = 1$ ,  $D' = 0$ ,  $E' = 0$  e  $F' = -\sin(\varphi)^2$ .

A cônica definida na Equação (4.11), para um valor qualquer de  $V_o$  e  $I_o$ , têm a forma geral dada por:

$$A'' X''_{(t)} + B'' X''_{(t)} Y''_{(t)} + C'' Y''_{(t)} + D'' X''_{(t)} + E'' Y''_{(t)} + F'' = 0 \quad (4.13)$$

onde  $A'' = V_o^2$ ,  $B'' = -2V_o I_o \cos(\varphi)$ ,  $C'' = I_o^2$ ,  $D'' = 0$ ,  $E'' = 0$  e  $F'' = -V_o^2 I_o^2 \sin(\varphi)^2$ .

A utilização das propriedades geométricas da Equação (4.12), referente a cada fase do sistema trifásico, permitirá o monitoramento das fases, de modo a identificar o momento em que possíveis faltas venham a acontecer. A alteração das propriedades da elipse pós falta definida pela Equação (4.13), como por exemplo, o valor do maior e do menor raio e a inclinação da elipse em relação ao eixo das abcissas, serão utilizados como variáveis em um sistema de classificação de tipo

de faltas. Outras variáveis utilizadas são os valores de pico dos sinais de tensão e corrente pós falta e o fator de potência envolvido. O valor do fator de potência, que está relacionado com o ângulo  $\varphi$ , e os valores de pico dos sinais também são parâmetro que afetam a disposição geométrica no espaço bidimensional. Portanto, a alteração do comportamento em condições normais de uma dada fase do sistema irá acarretar em uma modificação da geometria da secção cônica, neste caso dada por uma elipse.

Neste trabalho, a análise dos parâmetros da elipse será utilizada para o diagnóstico das faltas. Tanto no processo de detecção do momento da ocorrência da falta, quanto para a classificação do tipo da falta.

#### 4.2.1 Estimando os coeficientes de uma secção cônica

Conhecido os valores nominais de operação de uma fase de uma linha de transmissão,  $V_o$ ,  $I_o$  e o fator de potência ( $\cos(\varphi)$ ), todos os coeficientes da secção cônica podem ser calculados a partir das Equações (4.12) e (4.13). Entretanto, os coeficientes  $A''$ ,  $B''$ ,  $C''$ ,  $D''$ ,  $E''$  e  $F''$  podem ser estimados a partir de uma amostra dos sinais de tensão e corrente. Assim, os valores de pico e o fator de potência também podem ser obtidos via estimação dos parâmetros da elipse, utilizando a equação geral da secção cônica, Equação (4.13).

Seja uma amostra referente a uma fase de uma linha de transmissão de tamanho maior ou igual a um ciclo do sinal.  $X''$  é um vetor de valores amostras do sinal da tensão,  $X''_{(t)} = V_o \cdot \sin(\omega t)$ , e  $Y''$ , um vetor de valores amostrais do sinal da corrente,  $Y''_{(t)} = I_o \cdot \sin(\omega t - \varphi)$ . Os coeficientes da secção cônica, na sua forma geral, podem ser estimados a partir da resolução de um sistema de equações lineares.

Em condições nominais de operação, os coeficientes  $D''$  e  $E''$  são nulos, Equação (4.13). Estes coeficientes estão associados ao deslocamento do centro da elipse, que definido a partir dos valores médios dos sinais da tensão e da corrente, respectivamente. Sob condições nominais de operação, a média dos sinais de tensão e corrente nas três fases de uma linha de transmissão é zero.

Dividindo toda a Equação (4.13) por  $-F''$ , tem-se:

$$AX''_{(t)}^2 + BX_{(t)}Y_{(t)} + CY''_{(t)}^2 + DX_{(t)} + EY = 1 \quad (4.14)$$

A Equação (4.14) pode ser representada na forma matricial  $\mathbf{x}\beta = \mathbf{y}$ , onde:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} X^2 & XY & Y^2 & X & Y \end{bmatrix}, \quad \beta = \begin{bmatrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{bmatrix} \quad e \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} 1 \end{bmatrix}$$

Desta forma, os valores dos coeficientes são estimados como:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}'\mathbf{x}\beta &= \mathbf{x}'\mathbf{y} & (4.15) \\ (\mathbf{x}'\mathbf{x})^{-1}(\mathbf{x}'\mathbf{x})\beta &= (\mathbf{x}'\mathbf{x})^{-1}\mathbf{x}'\mathbf{y} \\ \hat{\beta} &= (\mathbf{x}'\mathbf{x})^{-1}\mathbf{x}'\mathbf{y} \end{aligned}$$

Onde

$$\hat{\beta}^T = \begin{bmatrix} \hat{A} & \hat{B} & \hat{C} & \hat{D} & \hat{E} \end{bmatrix}$$

De acordo com a Equação (4.13), os coeficientes da secção cônica e os parâmetros da linha de transmissão, sob condições nominais de operação, estão associados na forma:

$$\begin{aligned} A &= \frac{A'}{-F'} = \frac{1}{I_o^2 \cdot \sin(\varphi)^2} & (4.16) \\ B &= \frac{B'}{-F'} = \frac{-2\cos(\varphi)}{V_o I_o \cdot \sin(\varphi)^2} \\ C &= \frac{C'}{-F'} = \frac{1}{V_o^2 \cdot \sin(\varphi)^2} \\ D &= \frac{D'}{-F'} = 0 \\ E &= \frac{E'}{-F'} = 0 \\ F &= \frac{F'}{-F'} = 1 \end{aligned}$$

Assim, valores estimados para  $V_o$ ,  $I_o$  e o fator de potência ( $\cos(\varphi)$ ), são obtidos a partir das expressões:

$$\cos(\hat{\varphi}) = \frac{-\hat{B}}{2\sqrt{\hat{A}} \cdot \sqrt{\hat{C}}} \quad (4.17)$$

$$\hat{I}_o = \frac{1}{\sqrt{\hat{A} \cdot \sin^2(\hat{\varphi})}} \quad (4.18)$$

$$\hat{V}_o = \frac{1}{\sqrt{\hat{C} \cdot \sin^2(\hat{\varphi})}} \quad (4.19)$$

#### 4.2.2 Rotação e translação de uma secção cônica no plano cartesiano

Uma secção cônica pode ser classificada como uma elipse, uma circunferência (forma particular da elipse), uma hipérbole ou parábola. Existem ainda os casos de cônicas degeneradas como uma reta, um ponto ou vazio. Uma forma de identificar a classificação de uma cônica, a partir de sua equação geral, é obtendo a forma reduzida (ou canônica) de sua equação [3]. Ou seja, fazendo  $b = 0$ ,  $d = 0$  e  $e = 0$ , dada sua equação geral da secção cônica por:

$$ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0 \quad (4.20)$$

O termo  $bxy$  está associados a rotação da cônica em relação aos eixos do plano cartesiano e os termos  $dx$  e  $ey$  estão associados a translação da cônica em relação a origem do plano.

A eliminação o termo  $bxy$  é feita através de uma rotação dos dados por um ângulo  $\alpha$ , obtendo um novo sistema de coordenadas:

$$x' = x \cdot \cos(\alpha) - y \cdot \sin(\alpha)$$

$$y' = y \cdot \cos(\alpha) + x \cdot \sin(\alpha)$$

A rotação também pode ser escrita em função de  $x$  e  $y$  como:

$$x = x' \cdot \cos(\alpha) + y' \cdot \sin(\alpha) \quad (4.21)$$

$$y = y' \cdot \cos(\alpha) - x' \cdot \sin(\alpha) \quad (4.22)$$

Substituindo na Equação (4.20) as expressões das Equações (4.21) e (4.22), e desenvolvendo a equação resultante, o novo coeficiente  $b'$  será nulo se e somente se:

$$(a - c) \cdot \sin(2\alpha) + b \cdot \cos(2\alpha) = 0$$

Assim, o ângulo  $\alpha$  é definido da seguinte forma:

- Se  $a = c$ , como  $b \neq 0$ , é necessário um ângulo, tal que:

$$\cos(2\alpha) = 0$$

Ou seja,  $\alpha = 45^\circ$  ou  $\alpha = 135^\circ$ .

- Se  $a \neq c$ ,  $\alpha$  é definido por:

$$\alpha = \frac{\arctan\left(\frac{-b}{a-c}\right)}{2} \quad (4.23)$$

Realizando a rotação com ângulo  $\alpha$  indicado, a seguinte expressão é obtida:

$$a'^2 + c'y'^2 + d'x' + e'y' + f' = 0 \quad (4.24)$$

Através da rotação o termo  $b'x'y'$  foi eliminado da Equação (4.24). Para obter a equação reduzida da cônica ainda é necessário eliminar os termos  $d'x'$  e  $e'y'$ , fazendo  $d' = 0$  e  $e' = 0$ . Desta forma, uma translação dos pontos  $x'$  e  $y'$  é realizada obtendo  $x''$  e  $y''$ , reescrevendo a Equação (4.24) da seguinte forma:

$$a' \left( x' + \frac{d'}{2a'} \right)^2 + c' \left( y' + \frac{e'}{2c'} \right)^2 + f' - a' \left( \frac{d'}{2a'} \right)^2 - c' \left( \frac{e'}{2c'} \right)^2 = 0$$

E fazendo:

$$x'' = x' + \frac{d'}{2a'}, \quad y'' = y' + \frac{e'}{2c'} \quad e \quad f'' = f' - a' \left( \frac{d'}{2a'} \right)^2 - c' \left( \frac{e'}{2c'} \right)^2$$

Após a rotação e translação, a equação reduzida da cônica fica definida como:

$$a'x''^2 + c'y''^2 + f'' = 0 \quad (4.25)$$

Ou na forma canônica da elipse:

$$\frac{x''^2}{\left(\frac{-f''}{a'}\right)} + \frac{y''^2}{\left(\frac{-f''}{c'}\right)} = 1 \quad (4.26)$$

Para a seção cônica da Equação (4.12), definida após padronização dos sinais, a rotação é realizada tomando  $\alpha = 45^\circ$ , visto que  $A' = C'$ , fazendo com que  $B' = 0$ . Como  $B' = -2 \cos(\varphi)$ , após a rotação o novo fator de potência,  $\cos(\varphi')$ , passa a ser nulo, com  $\varphi' = 90^\circ$ . Os valores do pico dos sinais também são alterados, deixando de ser unitários. A elipse na forma canônica da Equação (4.12), após a rotação e translação, é dada por:

$$\frac{X_{p(t)}^2}{\left(\frac{\sin(\varphi)^2}{1+\cos(\varphi)}\right)} + \frac{Y_{p(t)}^2}{\left(\frac{\sin(\varphi)^2}{1-\cos(\varphi)}\right)} = 1 \quad (4.27)$$

Ou na forma paramétrica por:

$$X_{p(t)} = \sqrt{\frac{\sin(\varphi)^2}{1+\cos(\varphi)}} \cdot \cos(\omega t) \quad (4.28)$$

$$Y_{p(t)} = \sqrt{\frac{\sin(\varphi)^2}{1-\cos(\varphi)}} \cdot \sin(\omega t) \quad (4.29)$$

Onde  $\sqrt{\frac{\sin(\varphi)^2}{1+\cos(\varphi)}}$  é o raio sobre eixo das abcissas e  $\sqrt{\frac{\sin(\varphi)^2}{1-\cos(\varphi)}}$  o raio sobre eixo das ordenadas.

Os pontos  $X_{p(t)}$  e  $Y_{p(t)}$  são obtidos a partir da rotação e translação de  $X'_{(t)}$  e  $Y'_{(t)}$ . E  $p$  indica que os dados foram inicialmente padronizados antes da rotação.

Para a seção cônica da Equação (4.13), que define a equação geral da cônica para qualquer valor de  $V_o$  e  $I_o$ , o valor do ângulo de rotação,  $\alpha$ , dependerá dos valores de  $V_o$ ,  $I_o$  e do fator de potência,  $\cos(\varphi)$ , e é definido pela Equação (4.23). Com a rotação tem-se que  $B'' = 0$ , como  $B'' = -2V_o I_o \cos(\varphi)$ , após a rotação o novo fator de potência,  $\cos(\varphi')$ , também passa a ser nulo, com  $\varphi' = 90^\circ$ . A elipse na forma canônica para a Equação (4.13) é:

$$\frac{X_{(t)}^2}{\left(\frac{-f''}{a'}\right)} + \frac{Y_{(t)}^2}{\left(\frac{-f''}{c'}\right)} = 1 \quad (4.30)$$

O valor do raio sobre o eixo das abcissas é definido por  $\sqrt{\frac{-f''}{a'}}$  e o raio sobre os eixos das ordenadas é  $\sqrt{\frac{-f''}{c'}}$ . Os pontos  $X_{(t)}$  e  $Y_{(t)}$  são obtidos a partir da rotação e translação de  $X''_{(t)}$  e  $Y''_{(t)}$  e  $a'$ ,  $c'$  e  $f''$  são dados por:

$$\begin{aligned} a' &= V_o^2 \cdot \cos(\alpha)^2 + I_o^2 \cdot \sin(\alpha)^2 - 2V_o I_o \cos(\varphi) \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \\ c' &= V_o^2 \cdot \sin(\alpha)^2 + I_o^2 \cdot \cos(\alpha)^2 + 2V_o I_o \cos(\varphi) \cdot \sin(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \\ f'' &= -V_o^2 I_o^2 \sin(\varphi)^2 \end{aligned}$$

Para  $\varphi = 0$  ou  $\varphi = 180^\circ$ , a cônica será uma elipse degenerada com um dos raios igual a zero e a equação definirá uma reta. Para os demais casos as Equações (4.12) e (4.13) representarão uma elipse.

Ao obter a equação canônica a partir da equação geral da elipse duas importantes características sobre a disposição geométrica da elipse são definidas: os raios e ângulo de rotação. Estas características, extraídas da elipse formada pelos sinais de pós falta, a partir da Equação (4.30), serão usadas como parte dos atributos na etapa de classificação das faltas.

A elipse da Equação (4.27), define a modelagem inicial proposta para a representação funcional de um sistema trifásico de corrente alternada em operação normal. Na prática, ao obter os valores de tensão  $X''$  e correntes  $Y''$  da linha de transmissão, é realizada uma padronização conforme Equações (4.3) e (4.4). Em seguida é realizada uma rotação e translação de eixo, chegando aos vetores  $X_{p(t)}$  e  $Y_{p(t)}$  que satisfazem a Equação (4.27). Ao realizar a rotação o ângulo de defasagem  $\varphi$  entre os sinais de tensão e corrente é alterado para  $90^\circ$  fazendo com que o fator de potência seja igual a zero. Desta forma, dado os valores de tensão e corrente em operação normal de uma fase da linha de transmissão, um modelo é definido. A variação desse modelo, provocado por uma possível falta, é utilizado com atributos para as etapas de detecção e classificação de faltas.

### 4.2.3 Inserindo uma componente estocástica

A representação funcional segundo o comportamento da secção cônica, não considera a existência de ruídos inerentes ao processo de geração, transmissão ou mesmo dos RPDs (Registadores Digitais de Pertubação), que coletam os dados de tensão e corrente nas subestações.

Para ter um modelo que represente, da melhor forma possível, o comportamento real das fases de uma linha de transmissão, uma componente estocástica é incorporada aos sinais de tensão e corrente, na forma:

$$\begin{aligned} V_{(t)} &= V_o \cdot \sin(\omega t) + \xi_V \cdot V_o \\ I_{(t)} &= I_o \cdot \sin(\omega t - \varphi) + \xi_I \cdot I_o \end{aligned}$$

onde  $\xi_V$  e  $\xi_I$  são duas variáveis aleatórias gaussianas, independentes e indenticamente distribuídas (iid),  $\xi_V \sim N(0, \sigma^2)$  e  $\xi_I \sim N(0, \sigma^2)$ ,  $0 < \sigma < 1$ .

Neste caso, o ruído é inserido no modelo através dos termos  $\xi_V \cdot V_o$  e  $\xi_I \cdot I_o$ , que podem ser interpretados como um ruído proporcional aos valores de pico da tensão e corrente.

A influência da componente estocástica na representação funcional da tensão e da corrente pode ser quantificada partindo da padronização dos valores de tensão e corrente:

$$\begin{aligned} X'_{(t)} &= \frac{V_{(t)}}{V_o} = \sin(\omega t) + \xi_V \\ Y'_{(t)} &= \frac{I_{(t)}}{I_o} = \sin(\omega t - \varphi) + \xi_I \end{aligned}$$

Utilizando as relações trigonométricas, obtem-se a seguinte equação cônica:

$$A'X'^2_{(t)} + B'X'_{(t)}Y'_{(t)} + C'Y'^2_{(t)} + D'X'_{(t)} + E'Y'_{(t)} + F' = 0 \quad (4.31)$$

onde:

$$A' = 1$$

$$B' = -2 \cos(\varphi)$$

$$C' = 1$$

$$D' = 2\xi_V \cdot \cos(\varphi) - 2\xi_I$$

$$E' = -2\xi_V \cdot \sin(\varphi)^2 - 2\xi_V \cdot \cos(\varphi)^2 + 2\xi_I \cdot \cos(\varphi)$$

$$F' = \xi_V^2 \cdot \sin(\varphi)^2 + \xi_V^2 \cdot \cos(\varphi)^2 + \xi_I^2 - 2\xi_I \xi_V \cdot \cos(\varphi) - \sin(\varphi)^2$$

É importante destacar que os valores esperados para  $D'$ ,  $E'$  e  $F'$  são:  $E[D'] = 0$ ,  $E[E'] = 0$  e  $E[F'] = -\sin(\varphi)^2$ , onde  $E[.]$  representa a esperança matemática. A partir deste resultado, pode-se dizer que a componente estocástica não altera a rotação da elipse em relação ao plano cartesiano, visto que, o coeficiente  $B'$  que

indica a presença da rotação não é alterado. Os valores esperados nulos indicam que o valor médio da elipse tem as mesmas características da elipse sem ruído. O comportamento teórico dos valores de tensão e corrente, na presença de ruído é mostrado na Figura 4.5.

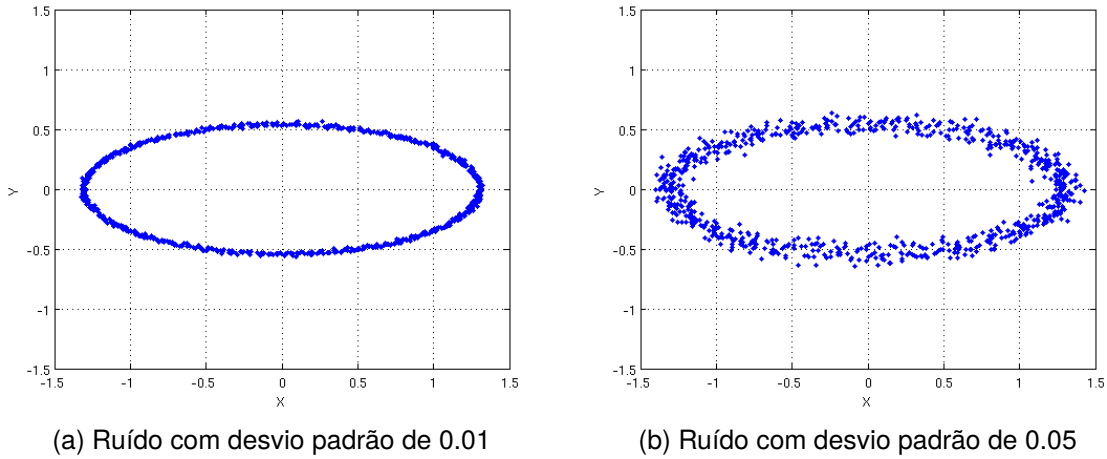


Figura 4.5: Elipses com presença da componente estocástica.

O parâmetro de dispersão ( $\sigma^2$ ) pode ser estimado a partir da distância quadrática média dos pontos em relação ao valor esperado, ou de forma equivalente, a partir da distância quadrática média dos pontos em relação à elipse sem ruído.

Seja a equação canônica de uma elipse na sua forma paramétrica definida como:

$$x(t) = a \cdot \cos(\omega t) \quad e \quad y(t) = b \cdot \sin(\omega t)$$

onde  $a$  é o raio maior e  $b$  o raio menor da elipse.

O seguinte modelo para a presença do ruído nos dados está sendo considerado:

$$x(t) = a \cdot \cos(\omega t) + \xi_x \quad e \quad y(t) = b \cdot \sin(\omega t) + \xi_y \quad (4.32)$$

Como mostrado anteriormente, através da Equação (4.31), a seguinte propriedade se aplica:

$$E[x(t)] = a \cdot \cos(\omega t) \quad e \quad E[y(t)] = b \cdot \sin(\omega t) \quad (4.33)$$

Estamos interessados em analisar as propriedades da variável aleatória distância,  $d_{(t)}^2$ , definida da seguinte forma:

$$d_{(t)}^2 = \left( x_{(t)} - E[x_{(t)}] \right)^2 + \left( y_{(t)} - E[y_{(t)}] \right)^2 \quad (4.34)$$

Então, a distância quadrática de um ponto no instante  $t$  em relação ao valor esperado para esse ponto é definido por:

$$d_{(t)}^2 = \left( a \cdot \cos(\omega t) + \xi_x - a \cdot \cos(\omega t) \right)^2 + \left( b \cdot \sin(\omega t) + \xi_y - b \cdot \sin(\omega t) \right)^2$$

Desta forma, tem-se que:

$$d_{(t)}^2 = \xi_x^2 + \xi_y^2$$

Esta equação pode ser reescrita dividindo todos os termo por  $\sigma^2$  :

$$\frac{d_{(t)}^2}{\sigma^2} = \frac{\xi_x^2}{\sigma^2} + \frac{\xi_y^2}{\sigma^2}$$

É conhecido que a divisão entre o quadrado de uma variável com distribuição normal de média nula e seu parâmetro de variância, representa uma variável aleatória com distribuição Chi-quadrado, com 1 grau de liberdade [5]:

$$\frac{\xi_x^2}{\sigma^2} \sim \chi_1^2 \quad e \quad \frac{\xi_y^2}{\sigma^2} \sim \chi_1^2$$

Por definição, a soma de duas variáveis aleatória Chi-quadrado independentes também é uma variável aleatória Chi-quadrado com grau de liberdade igual a soma dos graus de liberdade:

$$\frac{d_{(t)}^2}{\sigma^2} \sim \chi_2^2$$

O valor esperado para uma Chi-quadrado é igual ao número de graus de liberdade da distribuição, desta forma:

$$E \left[ \frac{d_{(t)}^2}{\sigma^2} \right] = E [\chi_2^2] = 2$$

A partir dessa propriedade pode-se definir um estimador para  $\sigma$  a partir do método dos momentos, fazendo:

$$E [d_{(t)}^2] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{(t)}^2 = 2\sigma^2$$

Desta forma uma estimativa para o valor de  $\sigma$  pode ser definida como:

$$\hat{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{d_{(t)}^2} \quad (4.35)$$

Estimar o valor de  $\sigma$  através desse modelo teórico é possível desde que se tenha a informação do tempo  $t$  em que cada ponto da amostra foi gerado, podendo assim ser feito o cálculo da distância de acordo com a Equação (4.34). Porém, essa informação não é muito precisa, visto que, inconstâncias podem ocorrer na taxa de amostragem dos dados e na variação de parâmetros que definem o comportamento de um sistema elétrico, principalmente quando considerado um conjunto de dados de um sistema real.

Neste trabalho não é levado em consideração o tempo  $t$  em que cada ponto de uma amostra foi gerado, e sim a posição desse ponto em relação a média, definida por uma elipse previamente estimada a partir dos pontos dessa amostra.

De forma empírica, neste trabalho é proposto o cálculo da distância de um ponto  $P$ ,  $(x_i, y_i)$ , à uma elipse  $E$ , utilizado o método de otimização da Secção Áurea. A distância  $d(P, E)$  é definida a partir de um problema de otimização unidimensional, que busca o valor de  $t$  que minimiza a distância quadrática:

$$t^* = \arg \min_t \left[ \left( x_i - a \cdot \sin(\omega t) \right)^2 + \left( y_i - b \cdot \cos(\omega t) \right)^2 \right]$$

Uma vez encontrado o valor de  $t$  que minimiza a distância quadrática, a distância é definida por:

$$d^2(P, E) = \left( x_i - a \cdot \sin(\omega t^*) \right)^2 + \left( y_i - b \cdot \cos(\omega t^*) \right)^2$$

O estimador do parâmetro de dispersão é obtido a partir do valor da distância média, obtida para uma amostra de tamanho  $n$ . Uma vez que não existe uma equação estruturada entre o parâmetro  $\sigma$ , a distância média e o tamanho da amostra

$n$ , uma maneira conveniente de estimar o parâmetro  $\sigma$  é, condicionado ao tamanho da amostra, simular diversos valores para o parâmetro  $\sigma$  e estimar a distância média, para cada um dos valores simulados. A partir dos resultados, pode-se ajustar uma função que será posteriormente utilizada para, a partir da distância média real dos dados, estimar o parâmetro de dispersão. A Figura 4.6 mostra o comportamento simulado do parâmetro de dispersão e da distância média para uma amostra  $n = 1000$ .

Os resultados da simulação utilizando da otimização para definir o valor de  $t^*$ , que minimiza a distância quadrática, mostram que:

$$\hat{\sigma} \approx 1 \cdot \sqrt{d_i^2} \quad (4.36)$$

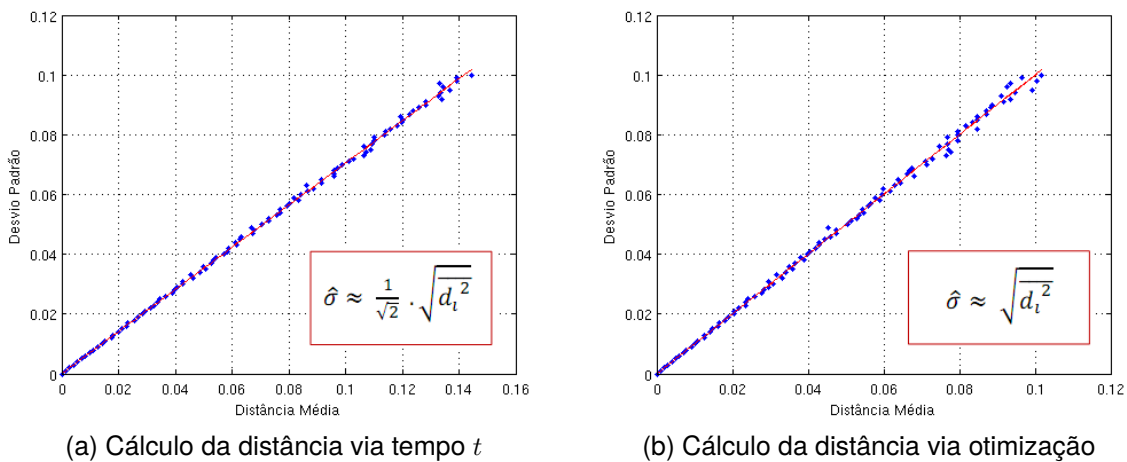


Figura 4.6: Comportamento simulado entre a distância média e o parâmetro de dispersão  $\sigma$ .

Utilizando a otimização para encontrar o  $t^*$ , o valor da média da distância quadrática, para um dado valor de  $\sigma$ , é menor que a média da distância quadrática quando utilizado o instante  $t$  em que o dados foi gerado, como pode ser observado pela inclinação nas retas que definem as duas abordagens, Equações (4.35) e (4.36). Esta diferença ocorre pelo fato do instante  $t^*$  obtido pela otimização, na maioria dos casos, não corresponder ao  $t$  em que o dado foi gerado, e sim a um  $t$  que minimiza a distância fazendo com que a média da distância diminua em relação ao modelo teórico.

Outra forma empírica de estimar a dispersão do ruído através da distância quadrática pode ser realizada através da FFT. Assim é possível, a partir da decomposição do sinal com ruído, Equação (4.32), reconstruir os sinais de tensão e corrente apenas para a frequência de  $60\text{Hz}$ , obtendo sinais sem ruído que representam o valor esperado como na Equação (4.33). Desta forma, é possível calcular a média da distância entre os pontos da amostra original e o sinal reconstruído pela FFT e estimar o  $\sigma$  de acordo com o modelo teórico da Equação (4.35). A Figura 4.7 mostra o comportamento simulado do parâmetro de dispersão e da distância média quando utilizado a FFT para uma amostra  $n = 1000$ .

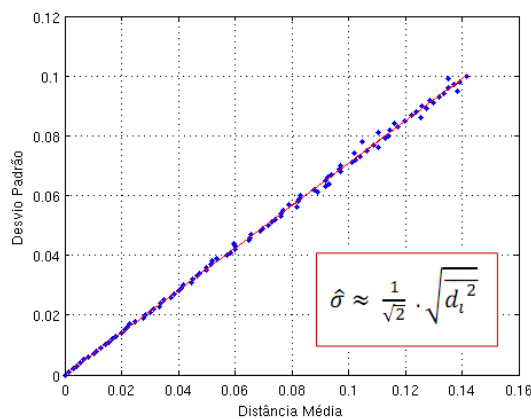


Figura 4.7: Comportamento simulado entre a distância média e o parâmetro de dispersão  $\sigma$  utilizando FFT.

Utilizar a abordagem com FFT tem, assim como no modelo teórico, a desvantagem de precisar utilizar o instante  $t$  em que o dado foi originado para poder fazer o cálculo da distância de acordo com a Equação (4.34). Através da abordagem utilizando otimização, temos a vantagem de não precisar considerar o  $t$  que originou o ponto em questão, pois nesse trabalho está sendo considerado apenas a localização desse ponto no espaço bidimensional.

O objetivo final da modelagem estocástica é a construção de um intervalo de confiança para o funcionamento das fases de uma linha de transmissão em condições normais de operação. A Figura 4.8 ilustra esse princípio, sob condições normais de operação, o comportamento da tensão e corrente limita-se aos limites superiores e inferiores da elipse que define o valor esperado para o comportamento dos sinais. Eventos adversos fazem com que a fronteira seja ultrapassada.

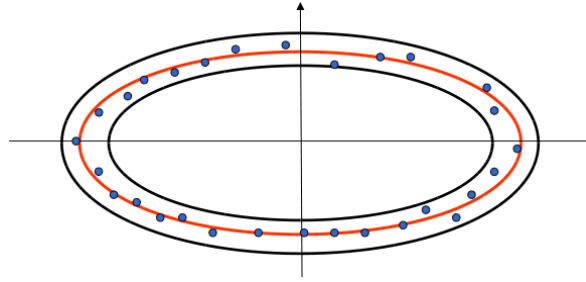


Figura 4.8: Limites inferiores e superiores da elipse definidos a partir da modelagem do ruído.

#### 4.2.4 Construção de intervalos de confiança

Conhecida a variância estimada para o ruído dos dados, um intervalo de confiança pode ser construído. O seguinte modelo para a presença do ruído nos dados está sendo considerado:

$$x(t) = a \cdot \cos(\omega t) + \xi_x \quad e \quad y(t) = b \cdot \sin(\omega t) + \xi_y \quad (4.37)$$

Onde  $a$  e  $b$  são os raios da elipse,  $\xi_V$  e  $\xi_I$  são duas variáveis aleatórias gaussianas (iid).

Deseja-se construir um intervalo de confiança,  $\gamma$ , para valores de  $x(t)$  e  $y(t)$ ,  $t \in \{0, \dots, 2\pi\}$ .

Analisando os instantes de tempo  $\omega t' = k\pi$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ , tem-se que  $x(t') = a + \xi_x$ , onde  $x(t')$  segue uma distribuição normal com média  $a$  e variância  $\sigma^2$ ,  $x(t') \sim N(a, \sigma^2)$ . Para  $\omega t'' = k\pi + \frac{\pi}{2}$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ , tem-se que  $y(t'') = b + \xi_y$ , onde  $y(t'')$  também segue uma distribuição normal com média  $b$  e variância  $\sigma^2$ ,  $y(t'') \sim N(b, \sigma^2)$ . Os instantes de tempo dado por  $t = t'$  e  $t = t''$  definem as regiões da elipse sobre os eixos do plano cartesiano.

Em  $x(t')$  e  $y(t'')$ , um intervalo de confiança para uma variável aleatória normal pode ser definido como:

$$IC [x(t'), \gamma] = a \pm Z_{\frac{\gamma}{2}} \cdot \sigma$$

$$IC [y(t''), \gamma] = b \pm Z_{\frac{\gamma}{2}} \cdot \sigma$$

Para um intervalo de confiança  $\gamma = 99,7\%$ , tem-se que  $Z_{\frac{\gamma}{2}} = 3$ .

Portanto, nos eixos, um intervalo superior e inferior pode ser representado por uma elipse com raios ajustados. Em  $x(t')$ , o raio pode ser ajustado para  $a + 3\sigma$ , como o limite externo e para  $a - 3\sigma$ , como o limite interno. Se  $3\sigma \geq a$ , o limite interno não

é definido. O mesmo se aplica à  $y(t'')$ , ajustando os raios para  $b + 3\sigma$ , com o limite externo e  $b - 3\sigma$  como o limite interno. Se  $3\sigma \geq b$ , o limite interno não é definido.

Dada a elipse na forma  $\frac{x(t)^2}{a^2} + \frac{y(t)^2}{b^2} = 1$ , nos eixos, quanto  $t = t'$  e  $t = t''$ , é possível mostrar, a partir da equação da forma reduzida da elipse, que:

$$\frac{x(t')^2}{(a \pm 3\sigma)^2} = 1 \quad \implies \quad x(t') = a \pm 3\sigma$$

$$\frac{y(t'')^2}{(b \pm 3\sigma)^2} = 1 \quad \implies \quad y(t'') = b \pm 3\sigma$$

Nos eixos, é mostrado que o comportamento das variáveis aleatórias é o mesmo, caso fosse considerado um efeito aditivo no raio da elipse, como mostrado a seguir:

$$x(t') = a \cdot \cos(\omega t') + \xi_x = (a + \xi_x) \cdot \cos(\omega t') = a + \xi_x \quad (4.38)$$

$$y(t') = b \cdot \cos(\omega t') + \xi_y = (b + \xi_y) \cdot \cos(\omega t') = b + \xi_y \quad (4.39)$$

Porém, este fato não é observado para a região complementar aos eixos, quando  $t \neq t'$  e  $t \neq t''$ . Entretanto, para a construção dos intervalos de confiança, a forma aditiva nos raios tem suas vantagens como:

- Gera limites superiores e inferiores também na forma de elipses.
- Gera regras simples para avaliar se pontos estão ou não no intervalo.

O efeito aditivo da variável aleatória nos raios não foi considerado ao estimar o valor da variância, por apresentar um modelo de difícil interpretação. Porém, este efeito aditivo nos raios será usada para definir os intervalos de confiança pelas vantagens apresentadas. Desta forma, o intervalo superior será formado pela elipse com o acréscimo de  $3\sigma$  nos raios e a inferior com o decréscimo de  $3\sigma$  nos raios. Uma regra simples para identificar se um ponto  $P = (x_p, y_p)$  está contido no intervalo consiste em verificar se o ponto satisfaz às condições:

$$\begin{aligned} a) \quad & \frac{x_p^2}{(a - 3\sigma)^2} + \frac{y_p^2}{(b - 3\sigma)^2} \geq 1 \\ b) \quad & \frac{x_p^2}{(a + 3\sigma)^2} + \frac{y_p^2}{(b + 3\sigma)^2} \leq 1 \end{aligned} \quad (4.40)$$

Construir esse intervalo de confiança define o modelo funcional proposto para as fases de uma linha de transmissão em operação normal. A partir dele é possível um monitoramento da linha de transmissão. Quando ultrapassados os limites desse monitoramento, o sinal da tensão e da corrente passam pela avaliação de um classificador que irá identificar se ocorreu ou não uma falta. Se a falta ocorreu essa será classificada.

### 4.3 Detecção da falta

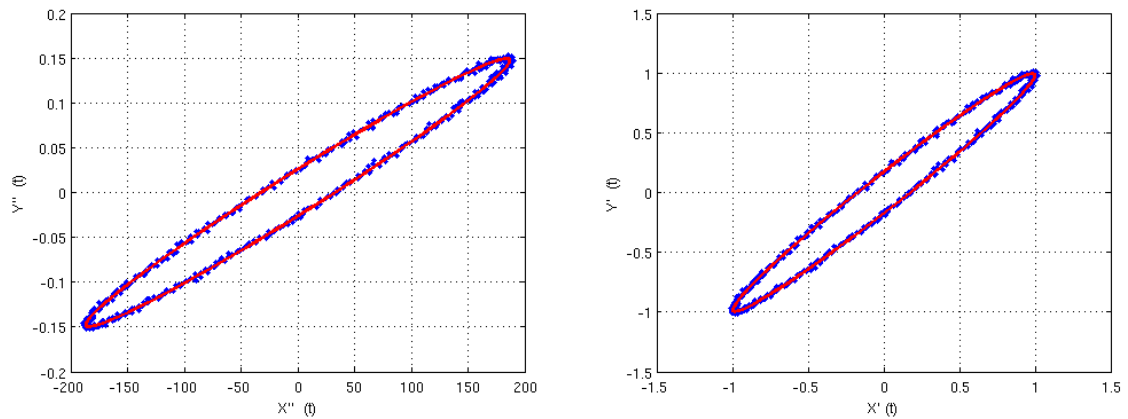
A estratégia de detecção de falta é iniciada pelo monitoramento de uma região de controle, para cada fase da linha, definida a partir de uma amostra dos sinais de tensão e corrente em operação normal,  $[X''_{(t)}, Y''_{(t)}]$ , respectivamente. O tamanho da amostra utilizada deve ter um tamanho mínimo de um ciclo do sinal, para que a elipse possa ser estimada corretamente. Neste trabalho utilizou um amostra de 5 ciclos dos sinais.

A partir dos sinais  $[X''_{(t)}, Y''_{(t)}]$ , os valores de pico,  $V_o$  e  $I_o$ , e o fator de potência,  $\cos(\varphi)$ , podem ser estimados conforme seção 4.2.1. Os sinais são então padronizados, conforme Equações (4.3) (4.4) da seção 4.2, dando origem a novos sinais,  $[X'_{(t)}, Y'_{(t)}]$ .

Na seção 4.2.2, foi mostrado que ao rotacionar e transladar a elipse estimada para os sinais padronizados,  $[X'_{(t)}, Y'_{(t)}]$ , é obtida uma elipse,  $E$ , na forma reduzida, dada pela Equação (4.27). A rotação é dado por um ângulo  $\alpha = 45^\circ$ , fazendo com que a elipse fique com raio maior posicionado sobre o eixo das abcissas. A elipse  $E$  representa o modelo teórico proposto para o comportamento esperado de uma fase da linha de transmissão, após as transformações dos sinais. Realizando a rotação e translação dos dados,  $[X'_{(t)}, Y'_{(t)}]$ , é obtido um novo conjunto  $[X_{p(t)}, Y_{p(t)}]$ . O efeito de translação dos pontos gera o mesmo resultado que extrair a média dos sinais.

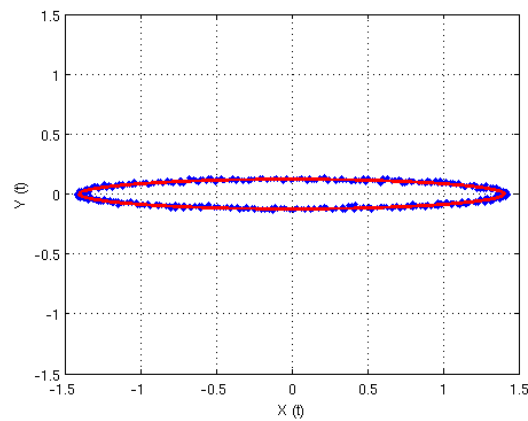
A Figura 4.9 mostra o resultado das etapas de pré-processamento de uma amostra dos sinais de tensão e corrente. A elipse estimada para cada amostra é apresentada em vermelho.

Desta forma, a partir dos sinais de tensão e corrente pré-processados,  $[X_{p(t)}, Y_{p(t)}]$ , e da elipse,  $E$ , a variância ( $\hat{\sigma}$ ) do ruído é estimada pela seção 4.2.3 e limites inferiores e superiores, representados por novas elipses, são construídos conforme seção 4.2.4. Definindo, assim, uma região de controle, onde novos sinais de tensão e corrente devem satisfazer as condições da Equação (4.40), Figura 4.10.



(a) Amostra original de tensão e corrente.

(b) Amostra de tensão e corrente padronizada.



(c) Amostra de tensão e corrente padronizada, rotacionada e transladada.

Figura 4.9: Etapas de pré-processamento de uma amostra de tensão e corrente.

### 4.3.1 Monitoramento das fases

Para cada uma das fases da linha de transmissão é então construída uma região de controle. Todos os novos conjuntos de pontos a serem analisados pela região devem ser pré-processados de acordo com as seguintes operações:

- padronização pelos valores de pico, estimados a partir da amostra inicial;
- rotação dos pontos por  $\alpha = 45^\circ$ ;
- translação dos pontos, conforme valores estabelecidos pela amostra inicial.

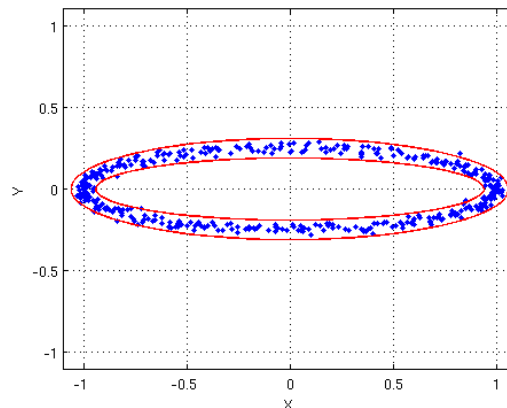


Figura 4.10: Limites inferiores e superiores definidos a partir da modelagem do ruído.

Um monitoramento de todas as fases é realizado, até que, em alguma delas os sinais extrapolem os limites estabelecidos. Foi definido neste trabalho que, ao obter um somatório de 3 pontos consecutivos fora da região de controle, é caracterizado uma possível falta no sistema.

Quando uma possível falta é detectada pelo monitoramento, o mesmo é interrompido e uma amostra de 5 ciclos dos sinais de tensão e corrente, pós-falta e pré-processados, é submetida a etapa de classificação. Essa amostra de cada fase é extraída logo após o instante de interrupção do monitoramento. A saída do classificador pode indicar uma operação normal do sistema, ou uma falta, no último caso, identificando o tipo de falta envolvida. Desta forma, a detecção ou não da falta só é finalizada após resultado do classificador.

Um fluxograma do monitoramento das fases de uma linha de transmissão é apresentado na Figura 4.11.

## 4.4 Métodos de classificação

Se uma falta ocorre, a elipse estimada para os dados  $[X_{p(t)}, Y_{p(t)}]$  apresentará um comportamento diferente do esperado, definido pela região de controle, e o classificador será encarregado de identificar e classificar o tipo de falta. Dos 5 ciclos do sinal pós-falta, são utilizados apenas os 3 últimos para caracterizar a falta via elipse estimada. Os primeiros ciclos são descartados para evitar que a dinâmica do início da falta atrapalhe na definição da elipse.

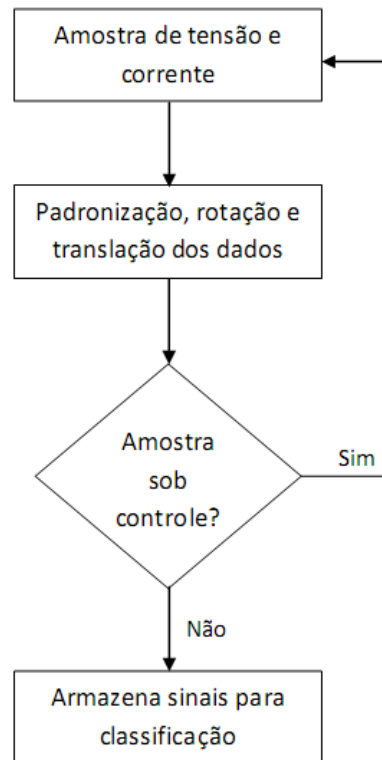


Figura 4.11: Fluxograma do monitoramento proposto para detecção de possível falta na linha de transmissão, por fase.

Como padrões de entrada para o classificador, as seguintes características dos sinais, representados por  $X_{p(t)}$  e  $Y_{p(t)}$ , e da elipse estimada para esse sinal, são utilizados:

- Valor de pico,  $V'_o$ ;
- Valor de pico,  $I'_o$ ;
- Fator de potência,  $\cos(\varphi)$ ;
- RaioX da elipse, raio de maior projeção sobre o eixo das abcissas;
- RaioY da elipse, raio de maior projeção sobre o eixo das ordenadas;
- Ângulo  $\theta$  de inclinação da elipse em relação ao eixo das abcissas.

Os coeficientes  $A''$ ,  $B''$ ,  $C''$ ,  $D''$ ,  $E''$  e  $F''$  da elipse, os valores de pico  $V'_o$ ,  $I'_o$  e o fator de potência ( $\cos(\varphi)$ ) são estimados, de acordo com a seção 4.2.1. Os raios da elipse são definidos conforme Equação (4.30) da seção 4.2.2.

De acordo com a seção 4.2.2, o ângulo  $\alpha$  necessário para rotacionar uma elipse posicionando seus raios sobre os eixos do plano cartesiano é:

$$\alpha = \frac{\arctan\left(\frac{-B''}{A''-C''}\right)}{2}$$

O ângulo  $\alpha$  é o menor ângulo a ser tomado para que os raios da elipse sejam projetados sobre os eixos do plano, assumindo valores entre  $-\frac{\pi}{2}$  e  $\frac{\pi}{2}$ . O sinal negativo indica uma rotação dos dados no sentido anti-horário.

A partir de  $\alpha$ , o ângulo  $\theta$  é definido da seguinte forma:

- Se, após uma rotação, o maior raio da elipse estiver projetado sobre o eixo das abcissas, então  $\theta = |\alpha|$ .
- Se, após uma rotação, o maior raio da elipse estiver projetado sobre o eixo das ordenadas, então  $\theta = \frac{\pi}{2} - |\alpha|$ .

Desta forma, o ângulo  $\theta$  representa o menor ângulo entre o raio maior da elipse e o eixo das abcissas.

Para cada fase o resultado de saída do classificador está relacionado a uma de quatro condições: 1 = operação normal, 2 = curto-circuito entre fases, 3 = curto-circuito entre fase e terra, 4 = fase aberta. Os resultados da classificação para cada fase são usadas por uma lógica de decisão, cuja saída indica o diagnóstico da falta. Essa mesma lógica foi utilizada no trabalho de Inácio [16]. A Tabela 4.1 mostra a lógica de decisão utilizada.

Na etapa de classificação foi utilizada o software de mineração de dados Weka [13]. A Weka é reconhecido como um marco no sistema mineração de dados e aprendizado de máquina e tem conseguido ampla aceitação nos meios acadêmicos e empresariais se tornando uma ferramenta amplamente utilizada para a tarefa de mineração de dados. Todos os algoritmos da Weka são implementados na linguagem JAVA e podem ser executados tanto pela interface gráfica quanto por linha de comando. Os classificadores avaliados foram: BayesNet, Decision Table, KNN, Árvore de Decisão J.48 e DTNB. A seguir, é feita uma breve apresentação dos três classificadores que apresentaram melhores desempenhos.

Tabela 4.1: Lógica de decisão.

Saída Fase A	Saída Fase B	Saída Fase C	Diagnóstico da Falta
1	1	1	Operação normal
2	2	1	Curto fases AB
1	2	2	Curto fases BC
2	1	2	Curto fases AC
2	2	2	Curto fases ABC
3	1	1	Curto fases A - T
1	3	1	Curto fases B - T
1	1	3	Curto fases C - T
3	3	1	Curto fases AB - T
1	3	3	Curto fases BC - T
3	1	3	Curto fases AC - T
4	1	1	Fase A - aberta
1	4	1	Fase B - aberta
1	1	4	Fase C - aberta
4	4	1	Fase AB - aberta
1	4	4	Fase BC - aberta
4	1	4	Fase AC - aberta

#### 4.4.1 Classificador via Rede Bayesiana - BayesNet

Na ferramenta Weka o classificador BayesNet corresponde a uma modelagem de uma Rede Bayesiana como um classificador. Uma Rede Bayesiana é um grafo direcionado acíclico (*Directed Acyclic Graph* - DAG) cujos nós representam variáveis aleatórias e os arcos representam dependências condicionais.

Considere  $U = \{x_1, \dots, x_k\}$ ,  $k \geq 1$ , um conjunto de variáveis. Uma rede Bayesiana  $B_s$ , construída a partir de um conjunto de variáveis  $U$ , é uma estrutura de rede, onde cada nó  $u$  tem associado uma tabela de probabilidades condicionadas  $P(u|Pais(u))$ , onde  $u \in U$ .  $Pais(u)$  são todos os nós que possuem arcos que vão em direção ao nó da variável  $u$ . Caso uma variável  $u$  não possua um nó pai, a sua tabela de probabilidades é reduzida a probabilidade incondicional ou marginal  $P(u)$ . A distribuição de probabilidades correspondente à rede é calculada a partir

das probabilidades condicionadas[4]:

$$P(U) = P(x_1, \dots, x_k) = \prod_{u \in U} p(u|Pais(u))$$

onde  $P(U)$  é a probabilidade conjunta para a rede e  $p(u|Pais(u))$  são as probabilidades condicionais de  $u$  em relação aos seus pais.

Para usar uma Rede Bayesiana como classificador, é necessário calcular a classe  $y$  que maximiza  $P(y|u) = P(U)/P(u)$  usando a distribuição  $P(U)$  representada pela Rede Bayesiana.

A construção de uma Rede Bayesiana compreende duas etapas, primeiro, deve-se definir a estrutura da rede, segundo, calcular a tabela de probabilidades condicionais para cada variável (nó) dado seus pais. Na Weka existem vários algoritmos para a construção da rede, esses estão compreendidos em quatro áreas distintas: *local score metrics*, *conditional independence tests*, *global score metrics* e *fixed structure*. As tabelas de probabilidades condicionadas podem ser estimadas via dois métodos denominados *SimpleEstimator* e *BMAEstimator* [4].

#### 4.4.2 Combining Naive Bayes and Decision Tables - DTNB

DTNB é um classificador híbrido que combina uma tabela de decisão (DT) com Naive Bayes (NB). O algoritmo divide os atributos em dois grupos distintos, onde um é modelado pelo Naive Bayes e o outro é modelado pela tabela de decisão. A divisão dos atributos é feita pela DT, onde todos os atributos são avaliados buscando um subconjunto que maximize o desempenho via validação cruzada [31]. O método de avaliação para o treinamento do DTNB é baseado na área sob a curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*) para avaliar a qualidade dos grupos de atributos.

As previsões produzidas pelo DT e NB são combinadas em uma previsão global usando a regra de Bayes. Considere  $X^T$  o conjunto de atributos utilizados na DT e  $X^\perp$  o conjunto de atributos utilizados no NB, a probabilidade global é computada como [12]:

$$Q(y|X) = \alpha \cdot Q_{DT}(y|X^T) \cdot Q_{NB}(y|X^\perp) / Q(y),$$

onde  $Q_{DT}(y|X^T)$  e  $Q_{NB}(y|X^\perp)$  são as probabilidades de classe estimadas a partir da DT e NB, respectivamente,  $\alpha$  é uma constante de normalização e  $Q(y)$  é a probabilidade a priori da classe. Todas as probabilidades são estimadas usando

*Laplace-corrected.*

Em Hall & Frank [12] foi realizada comparações entre DNTB com NB e DT baseado na AUC, mostrando uma melhor performance do DTNB.

#### **4.4.3 Aprendizado baseado em instância - IBk**

O algoritmo IBk é a implementação do conhecido *k-nearest neighbour* (KNN) no software Weka. A classificação de um padrão desconhecido é feito a partir da análise da classe predominante entre os k vizinhos mais próximos desse padrão. O k vizinhos mais próximos são definidos a partir de uma função de distância. O padrão é realizar o cálculo via distância Euclidiana. Outras opções são: *Chebyshev*, *Manhattan* e *Minkowski*. O número de vizinhos mais próximos é um inteiro positivo (padrão é  $k = 1$ ). Caso ocorra um empate entre as classes dos vizinhos mais próximos, a distância pode ser usada como critério de desempate [31].

# Capítulo 5

## Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados da metodologia de detecção e classificação de faltas em linhas de transmissão descrita neste trabalho. Para a avaliação do método proposto foi utilizada uma base de faltas obtidas a partir de um SEP simulado no software PSCAD e uma base real de faltas obtidas em linhas de transmissão da Cemig. A base de dados simulada foi obtida a partir do trabalho realizado por Inácio [16] onde é apresentado uma metodologia de diagnóstico de faltas utilizando Transformada Wavelet e Rede Lógica *Neurofuzzy*. Uma comparação dos resultados obtidos em ambos os trabalhos é apresentada no decorrer do capítulo.

### 5.1 Descrição da base de dados simulada

Neste trabalho é utilizado um conjunto de faltas obtidos pela simulação de um SEP. A utilização de dados reais de tensão e corrente de linhas de transmissão em estudos de diagnóstico de faltas nem sempre é possível, dada a grande quantidade de dados necessários para o treinamento. Os dados são disponíveis apenas para os sistemas de proteção das empresas concessionárias de energia elétrica. Por isso, os trabalhos relacionados com diagnóstico de faltas em linhas de transmissão normalmente utilizam de programas computacionais para simular um SEP e, conseqüentemente, obter um conjunto de faltas [16].

#### Modelo do Sistema Elétrico de Potência

As simulações de faltas em linhas de transmissão foram realizadas a partir de um SEP com duas fontes de  $230\text{ kV}$  interligadas por meio de uma linha de transmissão com comprimento de  $200\text{ km}$  e frequência nominal de  $60\text{ Hz}$  (Figura 5.1). Esse

SEP foi implementado no software PSCAD utilizando os modelos dos componentes existentes nas bibliotecas do mesmo. Esta base de dados foi obtida através do trabalho realizado por Inácio [16], onde podem ser encontradas informações mais detalhadas dos parâmetros dos componentes utilizados para a simulação.

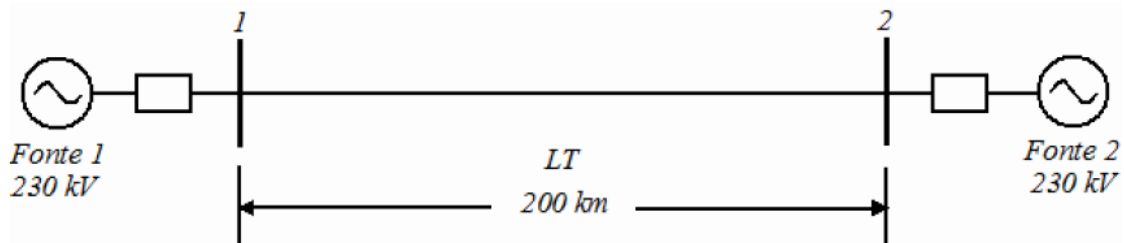


Figura 5.1: Modelo do SEP utilizado para simulações de faltas [16].

O PSCAD é ambiente gráfico completamente integrado para construção, execução e simulação de circuitos, possibilitando a análise e gerenciamento do dados. A Figura 5.2 mostra o modelo SEP implementado no PSCAD.

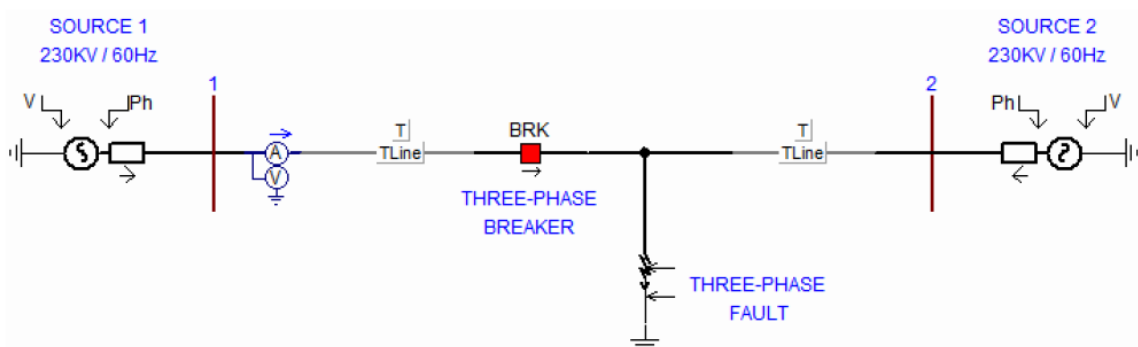


Figura 5.2: Modelo de SEP implementado no PSCAD [16].

Foram utilizados dois componentes para a simulação das faltas, *Three-Phase Fault* e o *Three-Phase Breaker*. O primeiro permite a geração de faltas do tipo curto-circuito entre fases e curto-circuito entre fases e terra, o segundo componente permite a geração de faltas do tipo circuito aberto em uma ou mais fases. O componente *Three-Phase Fault* modela uma falta resistiva, onde podem ser configuradas as resistências do componente nos estados ON e OFF, ou seja, a resistência apresentada pela falta em si e a resistência durante a operação sem falta [16].

## Simulação de faltas

A partir do SEP, implementado no PSCAD, foram simuladas um total de 16 tipos de faltas:

- Curto-circuito entre fases e terra - A-G, B-G, C-G, AB-G, AC-G, BC-G
- Curto-circuito entre fases - AB, AC, BC, ABC
- Circuito aberto - A-aberta, B-aberta, C-aberta, AB-aberta, AC-aberta, BC-aberta

O Sinais de tensão e corrente trifásicos, de todas as faltas simuladas na linha de transmissão, foram coletados a partir do barramento 1 (Figura 5.1) com uma frequência de amostragem de  $3.840\text{ Hz}$ , correspondendo a 64 amostras/ciclo ( $60\text{ Hz}$ ). As faltas foram provocadas no intervalo de tempo de  $0,2\text{ s}$  a  $0,3\text{ s}$  e geradas de acordo com diferentes cenários. Cada cenário corresponde à simulação de todos os 16 tipos de faltas com valores específicos para as seguintes variáveis:

- Distância da falta;
- Resistência da falta;
- Ângulo de incidência da falta;
- Ângulo de carga.

As faltas ocorridas a uma maior distância do ponto de medição dos sinais na linha de transmissão apresentam maiores dificuldades para serem detectadas e classificadas, pois quanto maior a distância, menores serão as correntes envolvidas na falta. A resistência de falta influencia no diagnóstico das faltas, pois o aumento da resistência implica na diminuição da corrente de falta. Com uma baixa corrente de falta, pode ser impossível distinguir a corrente de falta da corrente de operação normal da linha de transmissão. Em uma linha de transmissão real, as faltas podem ocorrer em qualquer ponto da forma de onda da tensão, o que significa que o ângulo de incidência pode variar de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  no semiciclo. Dependendo do ângulo de incidência da falta, há maior ou menor presença de harmônicos na linha. Num SEP o ângulo de carga representa a diferença angular entre as tensões nos terminais transmissor e receptor do sistema, e determina o fluxo de potência na linha de transmissão. Dessa forma, o ângulo de carga pode influenciar no diagnóstico das

faltas, uma vez que a variação do fluxo de potência na linha implica na variação da corrente na mesma, dificultando a distinção entre a corrente normal e corrente de falta [16].

Em cada cenário apenas o valor de uma variável é alterado, os outros valores são definidos pelo valor padrão estabelecido. A distância da falta em relação ao barramento 1 foi variada de 10% a 90% do comprimento total da linha, em intervalos de 20%, valor padrão é 100 *km*. Para as faltas do tipo curto-circuito entre fases ou entre fases e terra, as resistências de falta utilizadas foram variadas de 0,01 $\Omega$  a 100 $\Omega$ , valor padrão é 0,01 $\Omega$ . Para faltas do tipo circuito aberto foi utilizada apenas uma resistência de falta no valor de 1M $\Omega$ . O ângulo de incidência da falta foi variado de 30° a 150°, em passos de 30°, padrão é 30°. O ângulo de carga (ângulo de fase da fonte 2) foi variado de 10° a 30°, em passos de 10°, padrão é 10°. Desta forma, foram gerados 20 cenários com simulações de 16 tipos de faltas para cada cenário, resultado em um total de 320 faltas simuladas.

As Figuras 5.3 a 5.8 mostram exemplos de faltas simuladas tipo curto-circuito, curto-circuito com terra e fase aberta, no espaço bidimensional. O pontos em azul representa o intervalo pré-falta (0.1s – 0.2s), os pontos vermelhos correspondem a 5 ciclos do sinal pós-falta e em preto é mostrada a elipse estimada para a representação da falta. A partir dessa elipse são extraídos os atributos para classificação, como: picos dos sinais, raios da elipse e ângulo de rotação em relação ao eixo das abcissas. Apenas os 3 últimos ciclos do sinal pós-falta coletado foram utilizados para a caracterização da falta. Os sinais foram inicialmente transformados de acordo com os 3 passos do pré-processamento dos sinais (padronização, rotação e translação) de acordo com a metodologia.

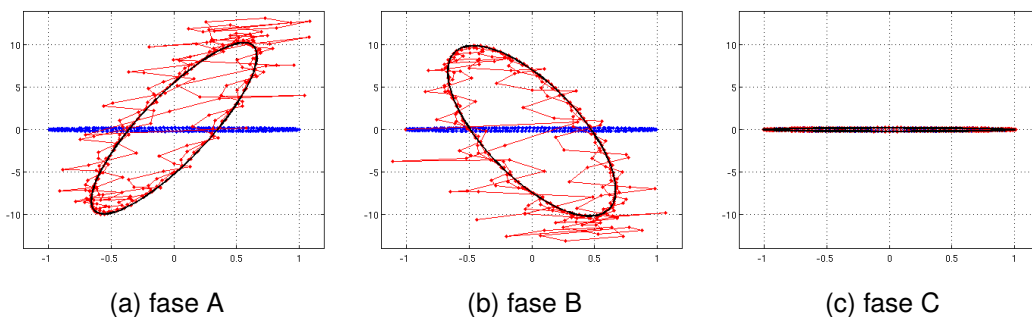


Figura 5.3: Falta simulada tipo curto-circuito entre fases AB.

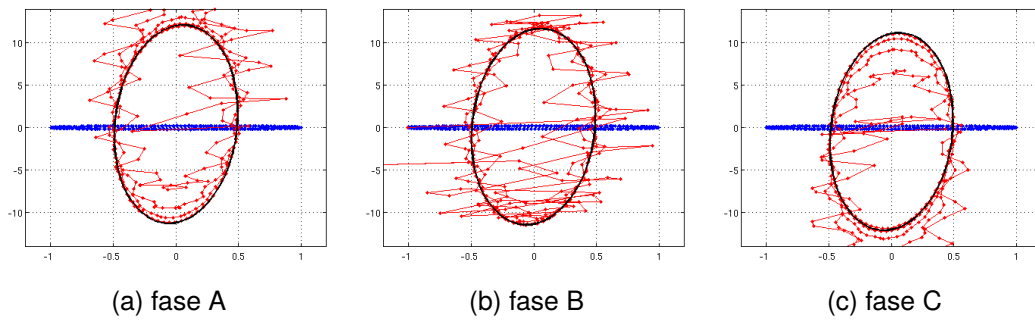


Figura 5.4: Falta simulada tipo curto-circuito entre fases ABC.

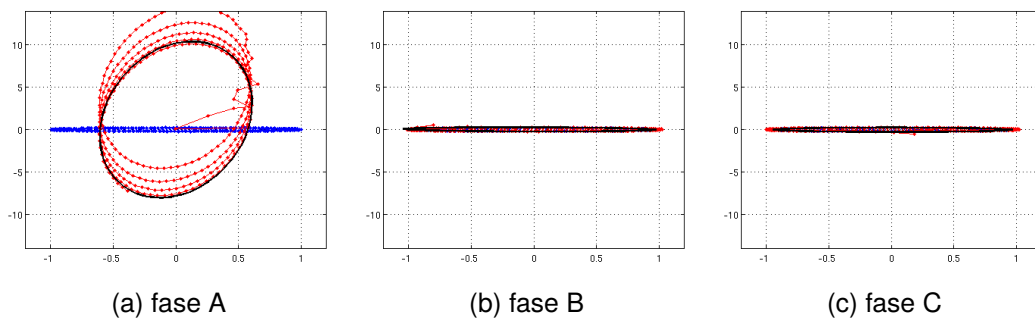


Figura 5.5: Falta simulada tipo curto-circuito entre fase A e terra.

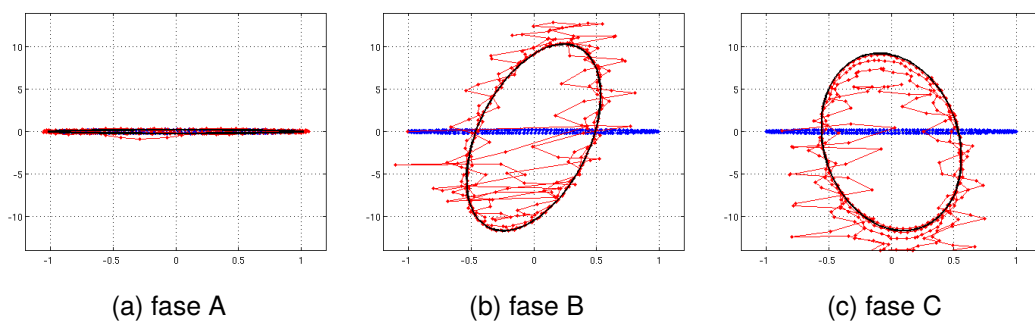


Figura 5.6: Falta simulada tipo curto-circuito entre fases AB e terra.

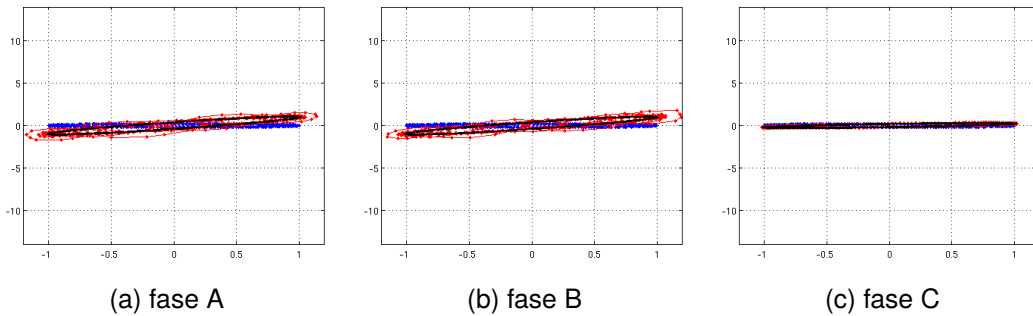


Figura 5.7: Falta simulada tipo circuito aberto nas fases AB.

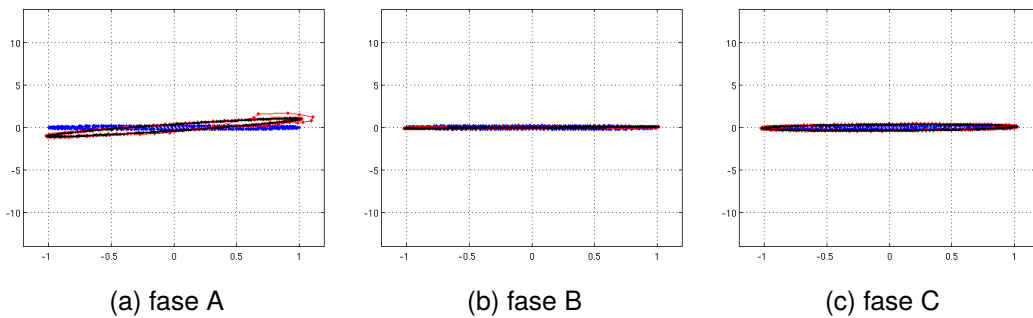


Figura 5.8: Falta simulada tipo circuito aberto na fase A.

## 5.2 Resultados obtidos com a base simulada

As 320 faltas simuladas, compreendendo 16 tipos de faltas, foram divididas em um conjunto de treinamento correspondendo à 80% da base e um conjunto de validação correspondendo à 20%. O pré-processamento dos dados e o monitoramento para a linha de transmissão foram implementado no software MATLAB e as fases de cada faltas foram classificadas utilizando a ferramenta Weka, versão 3.6.4, e a lógica de decisão (Tabela 4.1). Todos os classificadores foram utilizados com as configurações padrão presentes na ferramenta.

Nas Figuras 5.9 a 5.13, são apresentadas visualizações dos atributos 2 a 2, obtidos dos sinais de pós-falta, conforme metodologia proposta. De acordo com as figuras, é visto que, as classes são separáveis, mas não linearmente separáveis. Cada ponto representa uma das fases da falta e as classes estão indicadas por cores da seguinte forma:

- Azul - curto-circuito entre fases;
- Preto - Operação normal;
- Verde - fase aberta;
- Vermelho - curto-circuito entre fases e terra.

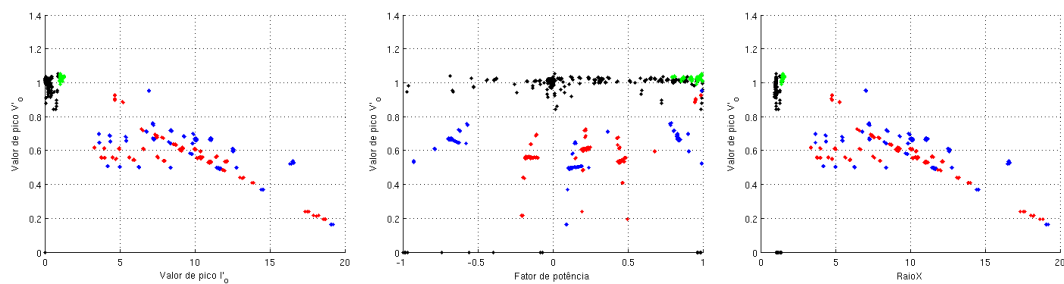


Figura 5.9: Visualização da separação das classes no espaço 2D.

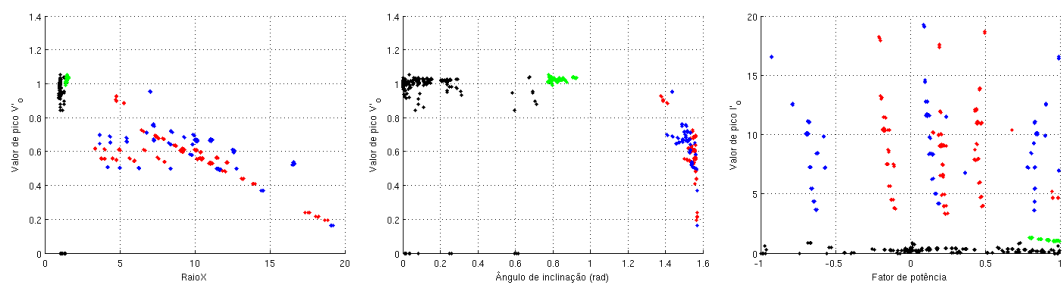


Figura 5.10: Visualização da separação das classes no espaço 2D.

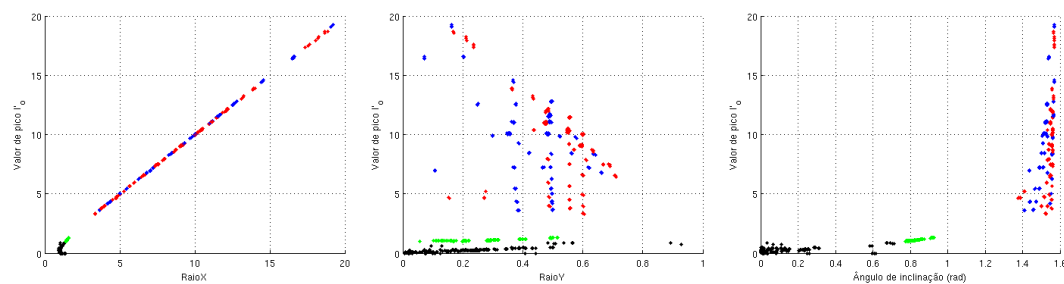


Figura 5.11: Visualização da separação das classes no espaço 2D.

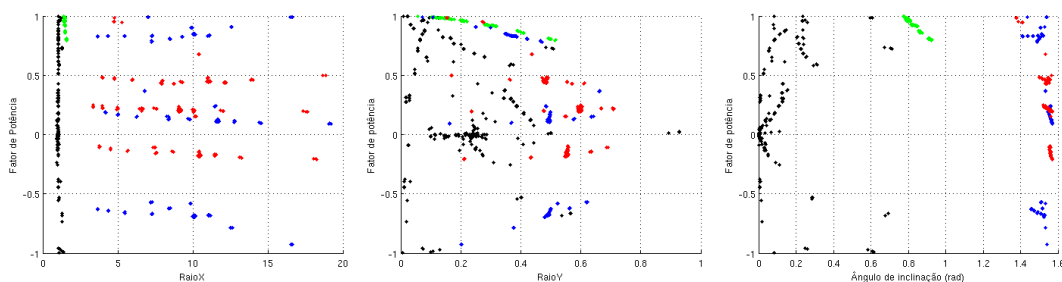


Figura 5.12: Visualização da separação das classes no espaço 2D.

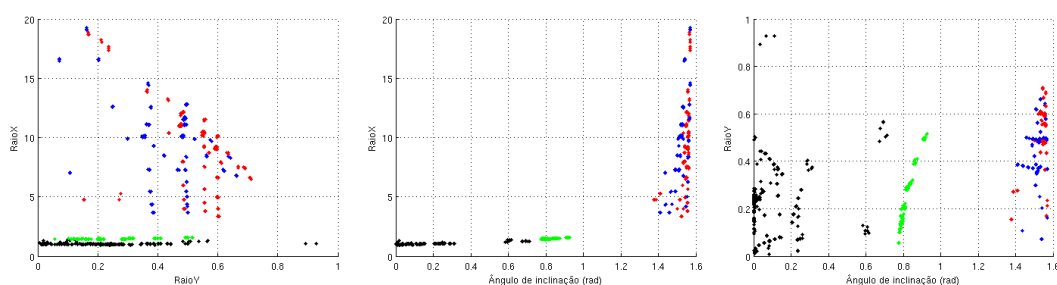


Figura 5.13: Visualização da separação das classes no espaço 2D.

Os resultados obtidos pelos classificadores avaliados na Weka são mostrados na Tabela 5.1. Para todos os classificadores foi utilizada a mesma base de treinamento e teste.

Tabela 5.1: Resultados de classificação

Condições da falta	Acurácia dos classificadores						
	BayesNet	Decision Table	DTNB	J.48	KNN k=1	KNN k=3	
<b>Âng. de carga</b>	99,1	91,4	96,7	95,6	98,5	96,3	%
<b>Âng. de incidência</b>	97,7	96,8	97,1	97,4	97,7	98,8	%
<b>Distância</b>	97,1	91,1	98,2	90,3	93,6	87,4	%
<b>Resistência</b>	98,2	87,1	97,1	97,5	99,8	99,7	%
<b>Média</b>	<b>98</b>	91,6	97,2	95,2	97,4	95,5	%
<b>Desvio Padrão</b>	0,8	3,9	0,6	3,4	2,7	5,6	

A estratégia proposta conseguiu detectar corretamente 100% das faltas e classificou corretamente 98% considerando o melhor desempenho, obtido pelo classificador BayesNet. O segundo melhor resultado foi obtido pelo KNN quando utilizado de K=1. O KNN é considerado um dos classificadores mais simples na área de mineração de dados. O DTNB também se destacou apresentando um bom resultado com 97,2% de acertos e um menor desvio padrão em relação as condições.

No trabalho de Inácio [16], que utilizou a mesma base de dados, foi obtido um acerto 97,1% na classificação e 99,7% na detecção das faltas com a mesma separação de 80% da base para treinamento e 80% para classificação. No trabalho foi utilizada a Transformada Wavelet na detecção das faltas e uma rede *neurofuzzy* para classificação a partir de amostras de sinais pós-falta. Os resultados foram considerados iguais aos melhores resultados encontrados na literatura para diagnóstico de faltas em linhas de transmissão.

A metodologia apresentou um bom desempenho para todas as condições em que as faltas foram simuladas. A distância da falta foi a condição que mais dificultou na classificação das faltas, considerando os dois melhores resultados, obtidos pelo BayesNet e KNN com K=1. No geral, o método proposto apresentou resultados satisfatórios e promissores quando comparados resultados da literatura analisada.

### 5.3 Descrição da base de dados da Cemig

Nesta seção é apresentado resultados preliminares, utilizando a metodologia proposta para extração de características da falta, obtidos a partir da utilização de uma base real de faltas ocorridas em diferentes linhas de transmissão.

As faltas foram obtidas através de um projeto de pesquisa e desenvolvimento entre a Companhia Energética de Minas Gerais - Cemig e o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE - UFMG). O objetivo do projeto é, uma vez que o sistema detectou uma falta, utilizar dos sinais de tensão e corrente da falta para identificar a causa que provocou a falta, como por exemplo, se foi uma queimada ou descarga elétrica. Desta forma, a Cemig poderá orientar a sua equipe de manutenção na reparação dos equipamentos faltosos.

Os tipos de faltas selecionadas foram as provocadas por queda de árvore (W1), descarga elétrica (ND), entrelaçamento de cabos (K6) e queimada (AQ). O número de informações documentadas com relação à faltas ocorridas em linhas de transmissão presente no sistema da Cemig é muito grande, entretanto, existem apenas uma pequena parcela de registros oscilográficos para essas faltas, obtidos através de RDPs (Registradores Digital de Pertubações).

Através de visitas realizadas à Cemig, foi possível coletar faltas ocorridas no período de 2001 à 2003. Em alguns casos foi possível obter mais de um registro de falta para uma mesma ocorrência de falta em um linha de transmissão. Isto ocorreu pelo fato de na mesma linha existirem dois RDPs, um em cada estação(fonte)

da linha. Ocorreu também do RDP registrar para a mesma falta mais de uma oscilografia referente à uma falta recorrente. Para o primeiro caso, foi selecionado apenas a oscilografia que apresentou a maior sobrecorrente em uma das fases, considerando que esse seja o mais representativo para caracterizar a falta. No segundo caso, foi selecionado apenas o primeiro registro para as faltas recorrentes.

A oscilografia para cada fase da linha de transmissão é formada por um período de tempo de sinal pré-falta (operação normal - OP) e período de falta, casos tenha ocorrido falta na fase. Para cada oscilografia foi extraído amostras de sinal em operação normal das 3 fases. Após o tratamento da base excluindo registros considerados redundantes, a base é dada de acordo com a Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Base de dados da Cemig.

<b>Tipo de falta</b>	<b>Número de registros</b>
OP - Operação Normal	41
AQ - Queimada	15
K6 - Entrelaçamento de Cabos	4
ND - Descarga Elétrica	15
W1 - Queda de Árvore	7
<b>Total</b>	<b>82</b>

As Figuras 5.14 a 5.21 mostram exemplos de faltas do tipo queimada, entrelaçamento de cabos, descarga elétrica e queda de árvore no espaço bidimensional. Os pontos em azul representa o intervalo pré-falta, os pontos vermelhos correspondem a 2 ciclos do sinal pós-falta (sinal obtido após detecção da falta) e em preto é mostrada a elipse estimada para a representação da falta. Os parâmetros dessa elipse foram utilizados como atributos de entrada do classificador, conforme descrito na metodologia.

## 5.4 Resultados obtidos com a base da Cemig

O método BayesNet foi utilizado para realizar a classificação, por ter apresentado melhores resultados para a metodologia proposta utilizando a base de dados simulada. Os atributos da falta foram extraídos das 3 fases da linha de transmissão, de acordo com a elipse formada pelos 2 ciclos do sinal pós-falta. Para a base real foi necessário utilizar um menor número de ciclos da falta, pois a abertura do disjuntor utilizado na proteção ocorre, na maioria das faltas analisadas, em menos de 3 ciclos do sinal de falta.

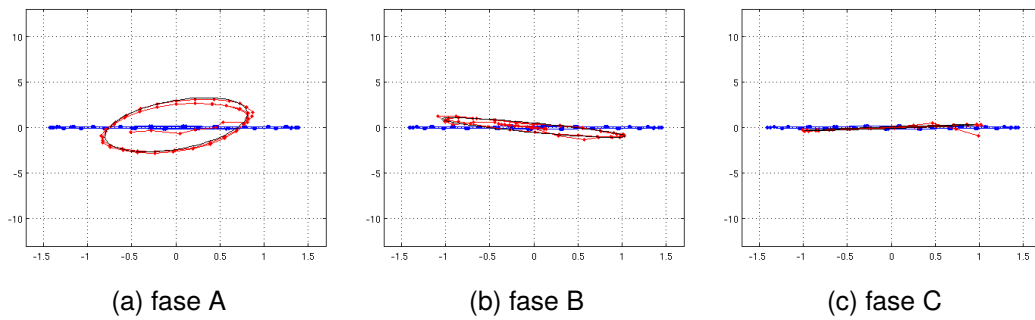


Figura 5.14: Falta tipo queimada.

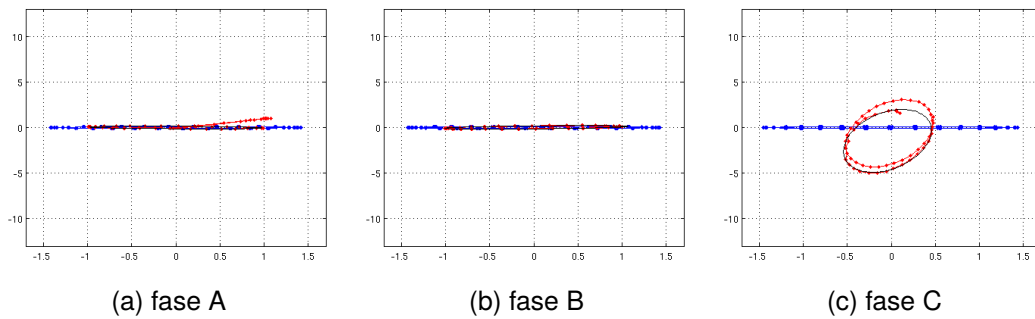


Figura 5.15: Falta tipo queimada.

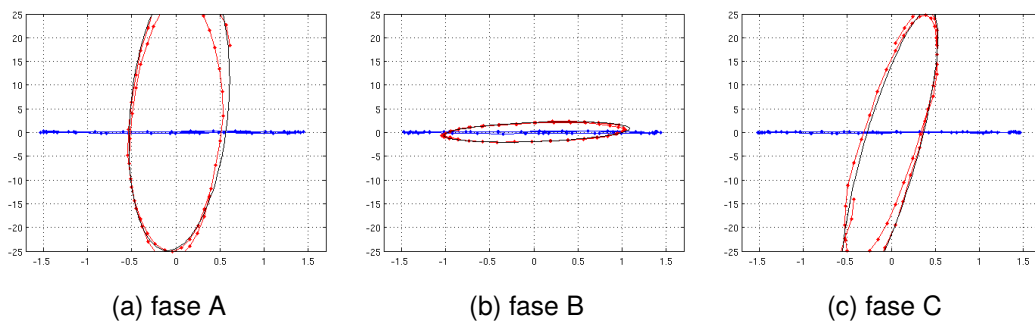


Figura 5.16: Falta tipo entrelaçamento de cabos.

A entrada do classificador é formada pelos 6 atributos de cada fase, gerando um vetor de tamanho 18. Para formar esse vetor de entrada, as fases são inicialmente ordenadas de acordo com a maior sobrecorrente da falta, em ordem decrescente. Desta forma, as 3 fases da linha de transmissão são utilizadas ao mesmo tempo para realizar a classificação, não sendo utilizado, assim, a lógica de decisão.

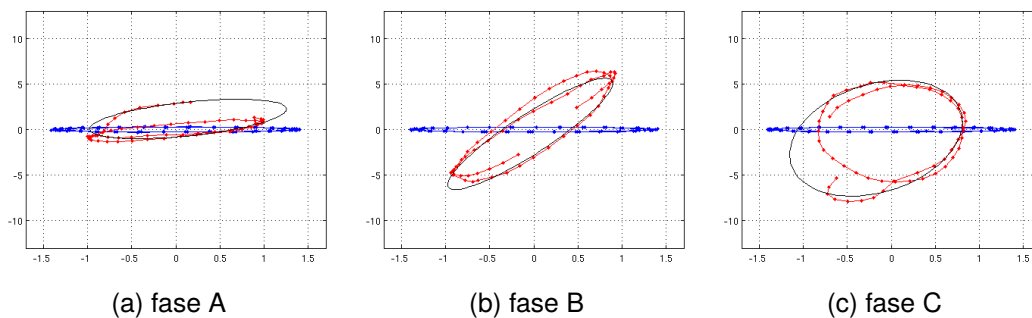


Figura 5.17: Falta tipo entrelaçamento de cabos.

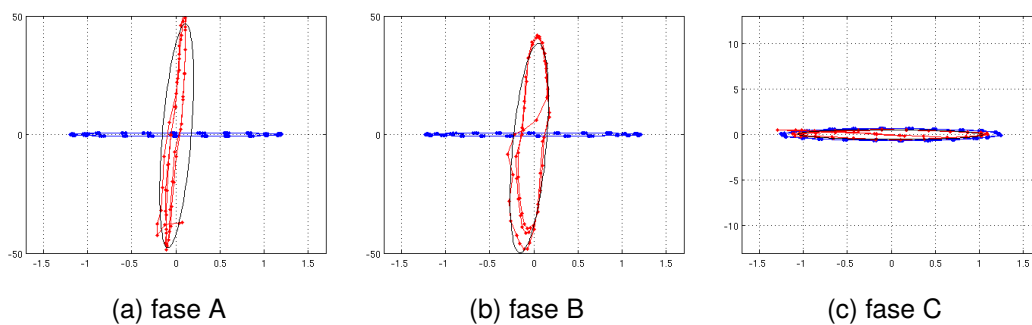


Figura 5.18: Falta tipo descarga eléctrica.

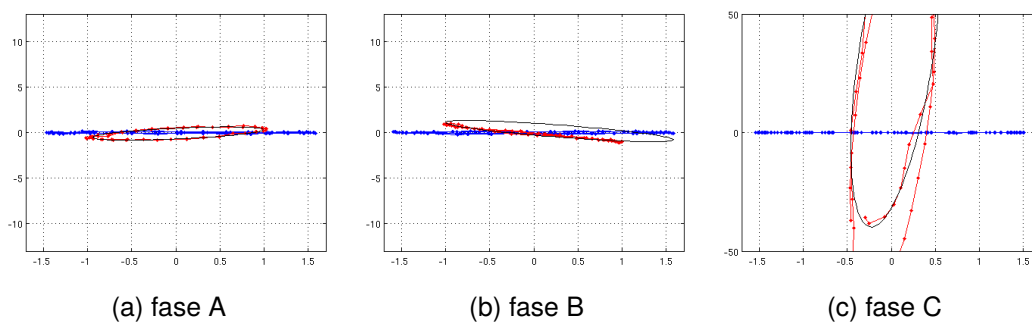


Figura 5.19: Falta tipo descarga eléctrica.

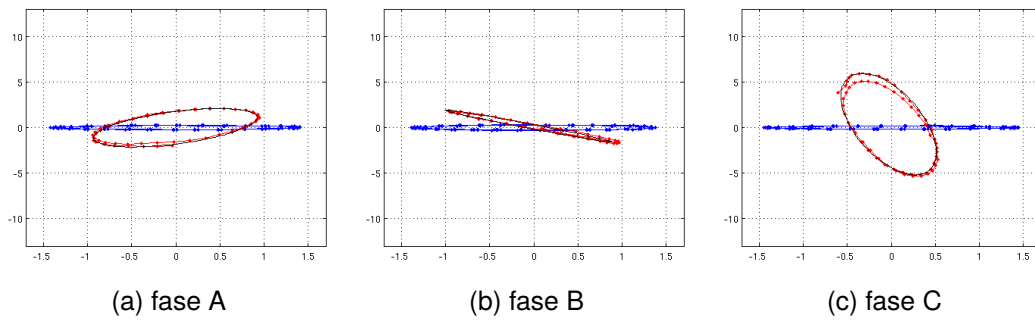


Figura 5.20: Falta tipo queda de árvore.

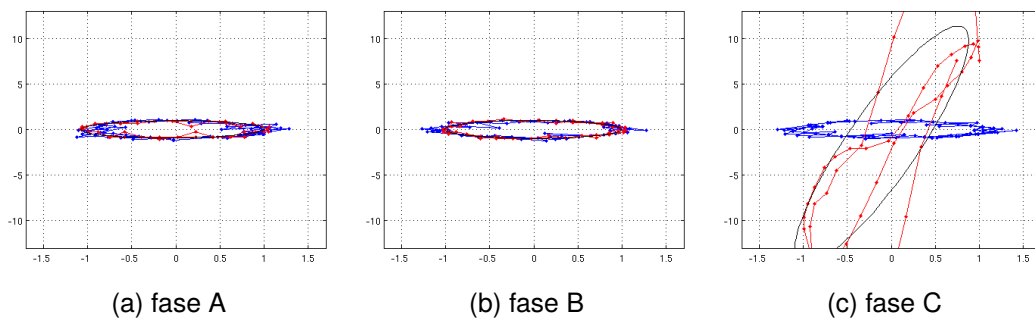


Figura 5.21: Falta tipo queda de árvore.

A classificação foi realizada utilizando validação cruzada com 5 *folds*, os resultados são apresentados na matriz de confusão apresentada na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Matriz de confusão.

OP	AQ	K6	ND	W1	
<b>41</b>	0	0	0	0	<b>OP</b>
0	<b>11</b>	0	4	0	<b>AQ</b>
0	0	<b>2</b>	0	2	<b>K6</b>
0	4	3	<b>7</b>	1	<b>ND</b>
0	2	1	2	<b>2</b>	<b>W1</b>

De acordo com a Tabela 5.3, 63 exemplos foram classificados corretamente, o que corresponde a 76,83% de acerto. O resultado apresentado é promissor, principalmente considerando que foram utilizado poucos exemplos de faltas. O classificador é capaz de classificar corretamente todas as condições normais de operação. Em relação aos eventos de queimadas, o classificador apresenta uma taxa de classificação de 73%. A taxa de classificação para os 4 exemplos relativos ao entrelaçamento de cabos é de 50%. Neste caso, a amostra é muito pequena, como relatado. Uma classificação de 47% é obtida para a classe de queimadas. Desses, 27% dos exemplos (4 eventos) se sobrepõe à categoria de queimada. A classificação do evento "árvore" é de 28,6%. Novamente, é verificada uma amostra reduzida para a categoria "árvore". Particularmente, para os casos de queda de árvore, a estimação da elipse foi comprometida pois a estimação dos parâmetros do modelo via mínimos quadrados resultou em um sistema singular.

# Capítulo 6

## Conclusões

Uma nova metodologia para detecção e classificação de faltas foi proposta neste trabalho. A linha de transmissão foi modelada em função da estrutura elíptica no espaço bidimensional, representada pelos sinais de tensão e corrente. Esse modelo permitiu obter estimativas dos parâmetros dos sinais tanto em pré-falta quanto em pós-falta.

A análise das variações geométricas, representadas por cada tipo de falta, mostrou ser uma estratégia inovadora para caracterizar os diferentes tipos de faltas simuladas sob diversas condições (distância da falta, resistência de falta, ângulo de incidência da falta e ângulo de carga).

Os resultados obtidos na classificação mostraram que, além de promissora, a metodologia é eficiente para diagnóstico de faltas, pois apresentou uma capacidade preditiva de 98% na classificação e 100% na detecção de faltas.

Resultados iniciais utilizando uma base de dados reais mostraram bons resultados, mesmo com poucos exemplos de faltas. Esses resultados ainda podem ser melhorados a partir de novas estratégia de montagem da base de atributos e também de uma nova lógica de decisão para o problema da base de dados da Cemig.

## 6.1 Trabalhos futuros

Considerando-se os resultados aqui obtidos e discutidos, sugerem-se os seguintes tópicos para trabalhos futuros:

- Estudo de caso utilizando uma base de dados reais de linhas de transmissão mais consistente;
- Avaliação de novos algoritmos de classificação;
- Avaliação de novas estratégias de classificação.
- Estudo sobre novos atributos para a classificação.

## 6.2 Produção científica

O seguinte artigo foi produzido a partir desta dissertação:

- Gomes, André de Souza; Costa, M. A. (2011). Detecção e classificação de faltas em sistemas de energia utilizando análise funcional e inteligência computacional. X Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI).

Também, como parte das atividades de pesquisa do programa de mestrado, o seguinte trabalho foi apresentado no XI Simpósio Brasileiro de Geoinformática - GeoInfo 2010:

- Pena, Carolina Silva.; Costa, M. A.; Gomes, André de Souza (2010). EpiNet/TerraView: Plug-in para simulação de enfermidades infecciosas em redes sociais com fluxo de populações. XI Brazilian Symposium on Geoinformatics - GeoInfo 2010, Campos do Jordão - SP.
  - Este trabalho foi selecionado como um dos três melhores artigos do GeoInfo 2010 e convidado a submeter uma versão estendida do artigo ao *Journal of the Brazilian Computer Society* (JBACS).

## Referências Bibliográficas

- [1] Abdollahi, A. & Seyedtabaii, S. (2010). Comparison of fourier & wavelet transform methods for transmission line fault classification. *4th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)*, pp. 579–584.
- [2] Bhowmik, P. S.; Purkait, P. & Bhattacharya, K. (2009). A novel wavelet transform aided network based transmission line fault analysis method. *Electrical Power & Energy Systems*, 31:213–219.
- [3] Boldrini, J. L.; Costa, S. I. R.; Figueiredo, V. L. & Wetzler, H. G. (1980). *Álgebra Linear*. Harper & Row do Brasil, 3a edição.
- [4] Bouckaert, R. R. (2004). Bayesian network classifiers in Weka. Working paper 14/2004. Department of Computer Science, University of Waikato, New Zealand.
- [5] Casella, G. & Berger, R. L. (2002). *Statistical Inference*. Duxbury Press, 2 edição.
- [6] Chiradeja, P. & Ngaopitakkul, A. (2009). Identification of fault types for single circuit transmission line using discrete wavelet transform and artificial neural networks. *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, 2:1520 – 1525.
- [7] Cury, D. V. (2002). *Introdução aos Sistemas Elétricos de Potência*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Disponível em: <[www.sel.eesc.sc.usp.br/protacao/apostilasep1.pdf](http://www.sel.eesc.sc.usp.br/protacao/apostilasep1.pdf)>. Acesso em 01 fev. 2011.
- [8] Das, B. & Reddy, J. V. (2005). Fuzzy-logic-based fault classification scheme for digital distance protection. *IEEE Transactions Power Delivery*, 20:609–616.
- [9] Dong, X.; Kong, W. & Cui, T. (2009). Fault classification and faulted-phase selection based on the initial current traveling wave. *IEEE Transactions Power Delivery*, 24:552–558.

- [10] Fernandez, A. L. O. & Ghonaim, N. K. I. (2002). A novel approach using a FIRANN for fault detection and direction estimation for high-voltage transmission lines. *IEEE Transactions Power Delivery*, 17:894–900.
- [11] Gayathri, K. & Kumarappan, N. (2008). Comparative study of fault identification and classification on EHV lines using discrete wavelet transform and fourier transform based ANN. *International Journal of Electrical, Computer, and Systems Engineering*, 2:125–136.
- [12] Hall, M. & Frank, E. (2008). Combining naive bayes and decision tables. *Proc 21st Florida Artificial Intelligence Research Society Conference*, AAAI Press.
- [13] Hall, M.; Frank, E.; Holmes, G.; Pfahringer, B.; Reutemann, P. & Witten, I. H. (2009). The WEKA data mining software: An update. *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*, 11:10–18.
- [14] Haykin, S. (2007). *Redes Neurais: Princípios e Práticas*. Bookman, 2 edição.
- [15] He, Z.; Fu, L.; Lin, S. & Bo, Z. (2010). Fault detection and classification in EHV transmission line based on wavelet singular entropy. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25:2156 – 2163.
- [16] Inácio, M. J. (2010). Detecção e classificação de faltas em linhas de transmissão utilizando transformada wavelet e rede lógica neurofuzzy com aprendizado participativo. Engenharia elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais.
- [17] Inácio, M. J.; Maia, R. D. & Caminhas, W. M. (2010). Detecção e classificação de faltas em linhas de transmissão baseadas em transformada wavelet e rede lógica neurofuzzy modificada com aprendizado participativo. *Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*, pp. 5123–5130.
- [18] Jang, J.-S. R.; Sun, C.-T. & Mizutani, E. (1997). *Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A computational approach to learning and machine intelligence*. Prentic-Hall.
- [19] Leão, R. P. S. (2010). *GTD Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica*. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará. Disponível em: <[www.dee.ufc.br/~rleao/GTD/I%20Introducao.pdf](http://www.dee.ufc.br/~rleao/GTD/I%20Introducao.pdf)>. Acesso em 01 fev. 2011.
- [20] Ling, F.; Zhengyou, H. & Zhiqian, B. (2009). Novel approach to fault classification in EHV transmission line based on multi-information measurements of fault transients. In *Power and Energy Engineering Conference*.

- [21] Mahanty, R. & Gupta, P. D. (2007). A fuzzy logic based fault classification approach using current samples only. *Electric Power Systems Research*, 77:501–507.
- [22] Malathi, V. & Marimuthu, N. S. (2008). Multi-class support vector machine approach for fault classification in power transmission line. *International Conference on Sustainable Energy Technologies*, pp. 67–71.
- [23] Oleskovicz, M. & Coury, D. V. (2001). A complete scheme for fault detection, classification and location in transmission lines using neural networks. *IEE Seventh International Conference on Developments in Power System Protection*, pp. 335–338.
- [24] O'Malley, J. (1983). *Análise de Circuitos*. MAKRON Books do Brasil, 1a. edição.
- [25] PSCAD (2005). *PSCAD User's Guide*. Manitoba HVDC Research Centre Inc., Manitoba, Canada.
- [26] Robba, E. J.; de Oliveira, C. C. B.; Schmidt, H. P. & Kagan, N. (1996). *Introdução a sistemas elétricos de potência - Componentes Simétricas*. Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 2 edição.
- [27] Tleis, N. D. (2008). *Power Systems Modelling and Fault Analysis - Theory and Practice*. Elsevier Ltd, Oxford, UK.
- [28] Upendar, J.; Gupta, C. P.; Singh, G. K. & Ramakrishna, G. (2010). PSO and ANN-based fault classification for protective relaying. *Generation, Transmission & Distribution, IET*, 4:1197 – 1212.
- [29] Valsan, S. P. & Swarup, K. S. (2009). Wavelet transform based digital protection for transmission lines. *Electrical Power and Energy Systems*, 31:379–388.
- [30] Vázquez, E.; Altuve, H. J. & Chacón, O. L. (1996). Neural network approach to fault detection in electric power systems. *IEEE International Conference on Neural Networks*, 4:2090–2095.
- [31] Witten, I. H.; Frank, E. & Hall, M. A. (2011). *Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques*. Morgan Kaufmann, Burlington, MA, 3 edição.
- [32] Youssef, O. A. S. (2004). Combined fuzzy-logic wavelet-based fault classification technique for power system relaying. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19:582–589.

- [33] Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy set. *Information and Computation/information and Control - IANDC*, 8(3):338–353.
- [34] Zhu, Z. & Sun, Y. (2009). Transmission line fault classification based on wavelet singular entropy and artificial immune recognition system algorithm. *2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System*, pp. 154–157.