



Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

# Dissertação de Mestrado

Modelagem de um Relé de Distância em um  
Simulador Digital em Tempo Real

Cecília Alves Buriti da Costa

Campina Grande - Paraíba - Brasil  
©Cecília Alves Buriti da Costa, agosto de 2016.



Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

## Modelagem de um Relé de Distância em um Simulador Digital em Tempo Real

Cecília Alves Buriti da Costa

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Energia

Benemar Alencar de Souza, D. Sc.  
Orientador

Núbia Silva Dantas Brito, D. Sc.  
Orientadora

Campina Grande - Paraíba - Brasil  
Agosto - 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

C837m Costa, Cecília Alves Buriti da.  
Modelagem de um relé de distância em um simulador digital em tempo real / Cecília Alves Buriti da Costa. – Campina Grande, 2016.  
108 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2016.  
"Orientação: Prof. Dr. Benemar Alencar de Souza, Prof. Dra. Núbia Silva Dantas Brito".

Referências.

1. Proteção de Distância. 2. Diagnóstico de Falta. 3. Simulador Em Tempo Real. 4. Faltas Em Linhas de Transmissão. 5. Algoritmos de Proteção. I. Souza, Benemar Alencar de. II. Brito, Núbia Silva Dantas. III. Título.

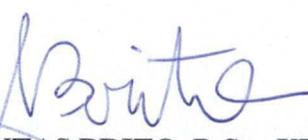
CDU 621.316.925.45(043)

**"MODELAGEM DE UM RELÉ DE DISTÂNCIA EM UM SIMULADOR DIGITAL EM  
TEMPO REAL"**

**CECÍLIA ALVES BURITI DA COSTA**

**DISSERTAÇÃO APROVADA EM 25/08/2016**

  
**BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG**  
Orientador(a)

  
**NUBIA SILVA DANTAS BRITO, D.Sc., UFCG**  
Orientador(a)

  
**DAMASIO FERNANDES JUNIOR, D.Sc., UFCG**  
Examinador(a)

  
**KARCIUS MARCELUS COLAÇO DANTAS, D.Sc., UFCG**  
Examinador(a)

**CAMPINA GRANDE - PB**

*Aos meus avós maternos, Maria Dirce e José Oliveira, que não puderam compartilhar comigo a alegria da finalização deste trabalho.*

# Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Elizabeth e Ricardo, por investir em minha educação e ajudar na realização desse sonho, e ao meu irmão Rodrigo, pelo companheirismo e ensinamentos.

Aos professores Benemar e Núbia, pela confiança, oportunidade e ensinamentos transmitidos ao longo dessa jornada.

A Rodolfo, por me apoiar na decisão de realizar esse trabalho e se fazer presente quando precisei.

Aos meus amigos de longa data, pela paciência e compreensão.

Aos amigos que fiz ao longo do curso, pelo compartilhamento dos problemas e alegrias da vida acadêmica.

Aos amigos Jamile, Daphne, Érica, Raphael, Felipe e demais colegas do LARCA e LSP, que estavam sempre dispostos a me ajudar e esclarecer problemas.

À Ângela e demais funcionários da COPELE, pela atenção e esclarecimentos ao longo desse período.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

# Resumo

Este trabalho apresenta o processo de modelagem de um relé de distância em um simulador digital em tempo real. O modelo inclui: i) as principais funcionalidades da arquitetura de um relé digital, incluindo filtro *anti-aliasing* e estimação fasorial; ii) as características de operação do tipo mho e quadrilateral, ambas com duas zonas de atuação; iii) a etapa de diagnóstico de falta, que informa as principais características do distúrbio. Para o diagnóstico da falta, foram avaliados métodos de detecção, classificação e localização por meio de simulação em massa de diferentes cenários de falta em uma linha de transmissão. Dos resultados obtidos, os melhores métodos de cada etapa foram escolhidos para compor o relé. Ao final, a atuação e o diagnóstico do relé modelado foram comparados com os resultados fornecidos pelo relé de distância disponível no próprio simulador e por um relé digital real.

**Palavras chave:** Proteção de distância, diagnóstico de falta, simulador em tempo real, faltas em linhas de transmissão, algoritmos de proteção.

# Abstract

This work presents the modeling process of a distance relay in a real-time digital simulator. The model contains: i) the main features of a digital relay architecture, including anti-aliasing filter and phasor estimation; ii) mho and quadrilateral operating characteristics, with two protection zones; iii) fault diagnosis, which informs the main features of the disturbance. For the fault diagnosis, detection, classification and location methods were evaluated using batch mode simulation of different fault scenarios in a transmission line. From the obtained results, the best methods were selected to be part of the modeled relay. At the end, the operation and diagnosis of the modeled relay were compared with the results presented by the distance relay model provided by the simulator manufacturer and by a digital relay.

**Keywords:** Distance protection, fault diagnosis, real-time simulator, transmission lines faults, protection algorithms.

# Sumário

Lista de Figuras.....	9
Lista de Tabelas.....	11
Lista de Símbolos.....	12
Glossário.....	14
Capítulo 1 - Introdução.....	16
1.2. Motivação.....	17
1.3. Objetivos.....	18
1.4. Contribuições .....	18
1.5. Metodologia Adotada .....	18
1.6. Produção Intelectual .....	19
1.6.1. Publicações Diretas .....	19
1.6.2. Publicações Correlatas.....	20
1.7. Organização da Dissertação .....	20
Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica .....	22
2.1. Análise dos Artigos mais Relevantes.....	22
2.2. Síntese Bibliográfica .....	28
Capítulo 3 - Fundamentação Teórica .....	30
3.1. O Relé Digital.....	32
3.2. Proteção de Distância .....	35
3.2.1. Características de Operação.....	37
3.3. Diagnóstico da Proteção.....	42
3.3.1. Detecção da Falta .....	43

3.3.2. Classificação da Falta .....	48
3.3.3. Localização da Falta.....	52
Capítulo 4 - Materiais e Métodos.....	58
4.1. Etapa de Modelagem.....	58
4.1.1. Modelagem do Sistema Elétrico.....	59
4.1.2. Processamento dos Sinais de Tensão e Corrente.....	64
4.1.3. Implementação dos Métodos .....	70
4.1.4. Implementação das Características de Operação.....	74
4.1.5. Etapa de Simulação.....	77
4.2. Rele de Distância do RTDS® .....	78
4.3. Relé SEL-311C.....	79
Capítulo 5 - Apresentação e Análise dos Resultados .....	82
5.1. Seleção do Método de Detecção da Falta .....	82
5.2. Seleção do Método de Classificação da Falta .....	86
5.3. Seleção do Método de Localização da Falta.....	88
5.4. Avaliação do Relé Modelado.....	92
5.4.1. Relé Modelado <i>versus</i> Relé do RTDS®.....	95
5.4.2. Relé Modelado <i>versus</i> Relé SEL-311C.....	96
Capítulo 6 - Conclusões.....	100
Referências Bibliográficas.....	102

# Lista de Figuras

Figura 3.1 - Diagrama de um sistema de proteção típico.....	30
Figura 3.2 - Cronologia dos relés de proteção.....	33
Figura 3.3 - Principais subsistemas de um relé digital.....	33
Figura 3.4 - Proteção de distância. (a) LT protegida; (b) Característica de operação mho de três zonas.....	36
Figura 3.5 - Característica mho polarizada com falta na direção direta.....	39
Figura 3.6 - Característica quadrilateral. ....	40
Figura 3.7 - Registro oscilográfico de uma falta com as indicações das etapas de pré-falta, falta e pós-falta.....	42
Figura 3.8 - Fluxograma do método de detecção TDQ.....	44
Figura 3.9- Fluxograma do método de detecção TW .....	46
Figura 3.10 - Fluxograma do método de detecção INC.....	47
Figura 3.11 - Fluxograma do método de classificação TDQ.....	48
Figura 3.12 - Fluxograma do método de classificação TW. ....	49
Figura 3.13 - Diagrama unifilar de uma LT com dois terminais.....	53
Figura 3.14 - Erro de reatância no método RS.....	55
Figura 4.1 - Diagrama unifilar do sistema-teste .....	60
Figura 4.3 - Modelo de fonte AC - módulo <i>Draft</i> .....	62
Figura 4.4 - Modelo de TC e TPC - módulo <i>Draft</i> .....	62
Figura 4.5 - Modelo de disjuntor - módulo <i>Draft</i> .....	62
Figura 4.6 - Lógica para abertura de disjuntor para <i>trip</i> de 1ª zona da característica mho .....	63
Figura 4.7 - Bloco cronômetro utilizado para medição do tempo de <i>trip</i> .....	63
Figura 4.8 - Sinais de corrente: (a) provenientes do TC e (b) filtrados pelo filtro Butterworth.....	65
Figura 4.9 - Sinal de tensão amostrado a 16 amostras por ciclo .....	66

Figura 4.10 – Bloco do filtro para remoção da componente CC de decaimento exponencial .....	67
Figura 4.11 – Comparação do sinal de corrente: (a) sem remoção da componente CC; (b) com remoção da componente CC.....	67
Figura 4.12 – Efeito na estimação fasorial: (a) sem remoção da componente CC; (b) com remoção da componente CC.....	68
Figura 4.13 – Implementação do processamento dos sinais de tensão e corrente. ....	70
Figura 4.14 – Blocos da etapa de detecção da falta .....	71
Figura 4.15 - Blocos da etapa de classificação da falta .....	72
Figura 4.16 – Bloco que indica as fases envolvidas na falta.....	72
Figura 4.17 - Blocos da etapa de localização da falta.....	73
Figura 4.18 – Bloco que salva as informações do sinal antes da aplicação da falta.....	74
Figura 4.19 – Circuito de polarização por memória de tensão.....	75
Figura 4.20 – Alcances de 1ª e 2ª zonas da característica mho.....	75
Figura 4.21 – Configuração dos elementos resistivos da característica quadrilateral para as duas zonas de proteção .....	76
Figura 4.22 – Comparadores de fase e de alcance para geração do <i>trip</i> e determinação da zona de atuação .....	76
Figura 4.23 – Comparadores para característica quadrilateral .....	77
Figura 4.24 – Relé de distância disponível no RTDS® .....	79
Figura 4.25 – Relé SEL-311C.....	80
Figura 4.26 – Esquema de conexão entre o relé SEL-311C e o RTDS® .....	81
Figura 5.1 – Disposição dos blocos construídos no módulo <i>Draft</i> .....	94
Figura 5.2 – Tela do módulo <i>RunTime</i> para observação das saídas do sistema. ....	94
Figura 5.3 – Medidores de tempo - resultados:.....	95
Figura 5.4 – Informações do diagnóstico da falta do relé modelado. ....	97
Figura 5.5 – Informações do diagnóstico da falta disponibilizado pelo <i>AcSELerator Analytic Assistant</i> . ....	97

# Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Síntese bibliográfica. ....	29
Tabela 3.1 - Ajustes de reatância e de resistência para os elementos fase-terra. ....	41
Tabela 3.2 - Ajustes de reatância e de resistência para os elementos fase-fase. ....	41
Tabela 3.3 - Classificação das faltas via método TDQ.....	49
Tabela 3.4 - Classificação das faltas via método TW.....	50
Tabela 3.5 - Classificação das faltas via método SC .....	51
Tabela 3.6 - Fasores utilizados para cada tipo de falta.....	53
Tabela 4.1 - Parâmetros das LT modeladas .....	60
Tabela 4.2 - Parâmetros dos equivalentes utilizados.....	60
Tabela 5.1 - Desempenho dos métodos de detecção da falta. ....	83
Tabela 5.2 – Métodos de detecção <i>versus</i> tipo de falta.....	84
Tabela 5.3 – Métodos de detecção <i>versus</i> local de ocorrência da falta. ....	84
Tabela 5.4 – Métodos de detecção <i>versus</i> ângulo de incidência da falta. ....	85
Tabela 5.5 – Métodos de detecção <i>versus</i> resistência da falta.....	86
Tabela 5.6 – Desempenho dos métodos de classificação das faltas.....	87
Tabela 5.7 – Métodos de classificação <i>versus</i> tipo de falta. ....	88
Tabela 5.8 – Métodos de localização <i>versus</i> tipo de falta.....	89
Tabela 5.9 – Métodos de localização <i>versus</i> local de ocorrência da falta. ....	90
Tabela 5.10 – Métodos de localização <i>versus</i> ângulo de incidência da falta.....	91
Tabela 5.11 – Métodos de localização <i>versus</i> imprecisão dos dados da LT.....	91
Tabela 5.12 – Métodos de localização <i>versus</i> resistência da falta. ....	92
Tabela 5.13 - Relé modelado <i>versus</i> RELÉ_RTDS.....	96
Tabela 5.14 - Relé modelado <i>versus</i> relé SEL-311C.....	98

# Lista de Símbolos

$A, B, C, N$	Coordenadas de falta (TW)
$A_{acb}$	Sinais trifásicos de tensão ou corrente
$A_d$	Sinal monitorado da fase A
$c_{dif}$	Coefficientes incrementais das componentes de eixo direto (TDQ)
$\tilde{e}_{ia}, \tilde{e}_{ib}, \tilde{e}_{ic}, \tilde{e}_{in}$	Energias dos coeficientes de aproximação das correntes (TW)
$\tilde{\mathcal{E}}_j$	Energia janelada dos coeficientes wavelet da escala $j$
$\tilde{E}_{ia}, \tilde{E}_{ib}, \tilde{E}_{ic}$	Valores médios das energias dos coeficientes de aproximação das correntes de fase (TW)
$F_{SE}$	Fator de sensibilidade da energia
$I_0$	Corrente de sequência zero
$\hat{I}_{a\_pre}$	Corrente na fase A em regime pré-falta
$\hat{I}_{b\_pre}$	Corrente na fase B em regime pré-falta
$\hat{I}_{c\_pre}$	Corrente na fase C em regime pré-falta
$I_d$	Corrente de eixo direto
$\hat{I}_F$	Corrente total de falta.
$\hat{I}_L$	Corrente no terminal local
$\hat{I}_{L1\_pre}$	Corrente de sequência positiva de pré-falta no terminal local
$I_{limiar}$	Valor de limiar da corrente residual
$\hat{I}_R$	Corrente no terminal remoto
$I_r$	Valor da corrente residual
$k$	Amostra atual

$L$	Número de coeficientes do filtro wavelet
$N$	Número de amostras por ciclo
$R_F$	Resistência de falta
$s$	Inclinação do sinal de corrente
$S$	Soma da inclinação dos sinais de corrente
$\hat{V}_{L1}$	Tensão sequência positiva de falta medidas no terminal local
$\hat{V}_{L1\_pre}$	Tensão de sequência positiva de pré-falta medida no terminal local
$Z_{ap}$	Impedância aparente medida no terminal local
$Z_{L1}$	Impedância da fonte no terminal local
$Z_{LT1}$	Impedância de sequência positiva da linha de transmissão
$Z_{R1}$	Impedância da fonte no terminal remoto
$\eta_{SM}$	Margem de segurança (TDQ)
$\theta$	Ângulo de fase da componente $A_d$
$\Delta k_{EN}$	Número de amostras utilizadas para o cálculo das energias (TDQ)
$\Delta t$	Período de amostragem
$\xi_{dif}$	Energias janeladas (TDQ)
$\rho_{gnd}$	Limiar de terra para classificação
$\rho_{ph}$	Limiar de fase para classificação
$\omega$	Frequência angular fundamental do sistema

# Glossário

A/D	Analógico/Digital
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATP	<i>Alternative Transient Program</i>
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program</i>
GTAO	<i>Gigabit Transceiver Analogue Output</i>
GTDI	<i>Gigabit Transceiver Digital Input</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Devices</i>
INC	Método da Inclinação do sinal de corrente
LT	Linha de Transmissão
PSE	Proteção de Sistemas Elétricos
RISC	<i>Reduced Instruction Set Computer</i>
RS	Método da Reatância Simples
RTDS	<i>Real Time Digital Simulator</i>
SC	Método de Sobrecorrente
SEL	<i>Schweitzer Engineering Laboratories</i>
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TACS	<i>Transient Analysis of Control Systems</i>
TC	Transformador de Corrente
TDFCC	Transformada Discreta de Fourier de Ciclo Completo
TDQ	Método da Transformada de Park

TNA	<i>Transient Network Analyzer</i>
TP	Transformador de Potencial
TPC	Transformador de Potencial Capacitivo
TW	Método da Transformada Wavelet

# Capítulo 1 - Introdução

O aumento da complexidade do Sistema Elétrico de Potência (SEP) aliado à exigência crescente dos consumidores por um serviço de melhor qualidade representa um desafio contínuo para as empresas do setor elétrico nas áreas de geração, transmissão e distribuição. Dentre os vários fatores que contribuem para a melhoria da qualidade, um dos principais é sem dúvida, a continuidade do fornecimento de energia elétrica, ou seja, a disponibilidade do SEP.

No Brasil, o órgão responsável por avaliar o desempenho das empresas de energia elétrica é a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), segundo a qual, um SEP é considerado indisponível quando ocorre desligamento programado ou não, ou atraso na entrada em operação (ANEEL, 2007). A disponibilidade está diretamente relacionada com a qualidade do sistema de proteção, que é definido como sendo o conjunto de equipamentos e acessórios destinados a realizar a proteção para curtos-circuitos (comumente denominados de faltas) e para outras condições de operação anormais em componentes do SEP (ANEEL, 2008).

Dada a sua importância, é vasta a literatura acerca de estudos e pesquisas relacionados com a busca pela melhoria do desempenho dos sistemas de proteção. Análise do estado da arte mostrou que alguns fatores foram determinantes para o avanço dessas pesquisas, dentre os quais se destaca aqui, o desenvolvimento de ferramentas de simulação, que viabilizaram a construção de modelos cada vez mais realísticos, inclusive a emulação da operação em tempo real. Esse tipo de simulação é muito útil para estudos diversos na área de Proteção de Sistemas Elétricos (PSE), como por exemplo: avaliação de esquemas de coordenação da proteção, desenvolvimento de novas funções ou aprimoramento das existentes por parte dos fabricantes (JANÍČEK & MUCHA, 2006).

Este trabalho insere-se nesse contexto e apresenta o processo de modelagem de um relé de distância em um simulador digital em tempo real. O modelo implementado inclui: i) as principais funcionalidades da arquitetura de um relé digital; ii) as características de operação do tipo mho e quadrilateral, ambas com duas zonas de atuação; iii) a etapa de diagnóstico de falta, ou seja, detecção, classificação e localização da falta.

## 1.2. Motivação

Atualmente, os simuladores estão disseminados em todas as áreas do conhecimento, pois permitem a simulação de situações realísticas em modo seguro e controlado. No caso particular de PSE, o uso de simuladores é ainda mais importante, haja vista a impossibilidade da realização de certos experimentos no sistema real propriamente dito e as restrições cada vez maiores impostas pela ANEEL.

Dentre os vários simuladores disponíveis atualmente, o *Real Time Digital Simulator* (RTDS®) é sem dúvida, um dos que permitem a realização de estudos mais realísticos. Para estudos relacionados à PSE, o RTDS® disponibiliza um modelo de relé de distância em sua biblioteca de componentes que, semelhante aos relés reais, não permite a modificação dos seus algoritmos. Segundo o jargão do setor, o relé do RTDS® é do tipo “caixa preta”. Isso posto, a principal motivação deste trabalho foi modelar um relé de distância do tipo “caixa branca”, o qual será integrado à biblioteca do RTDS®, o que permitirá aos usuários acesso a sua arquitetura e, portanto, o desenvolvimento de novos algoritmos e modelos.

### 1.3. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho foi modelar um relé de distância no RTDS® do tipo “caixa branca”, que seja capaz de realizar o diagnóstico completo de uma falta em uma linha de transmissão (LT). Para isso, os seguintes objetivos específicos foram cumpridos:

- Implementação da arquitetura do relé e das lógicas de atuação das características mho e quadrilateral de 1ª e 2ª zonas;
- Seleção/implementação dos métodos de detecção, classificação e localização das faltas a serem incluídos no relé;
- Avaliação do relé modelado no RTDS® com o relé disponibilizado no próprio simulador e com um relé digital real.

### 1.4. Contribuições

A contribuição principal deste trabalho consistiu na disponibilização de um relé de distância que permita a alteração e/ou inserção de algoritmos e componentes. Como contribuições secundárias destacam-se a capacidade de realizar um diagnóstico completo de uma falta e de visualizar a resposta de cada etapa do processo.

### 1.5. Metodologia Adotada

A metodologia adotada consistiu na execução das seguintes etapas:

1. Revisão bibliográfica dos trabalhos que envolvem modelagem de relés via simuladores;
2. Modelagem do sistema-teste fictício de 230 kV no RTDS® utilizando os componentes disponibilizados na sua biblioteca;

3. Modelagem da arquitetura do relé digital, incluindo as etapas de filtragem, decimação e estimação fasorial;
4. Elaboração de arquivo *script* para simulação em massa dos diversos cenários de faltas aplicadas no sistema-teste, que permite a variação automática dos parâmetros da falta (tipo, resistência, local e ângulo de incidência);
5. Implementação de nove algoritmos para detecção, classificação e localização da falta (três algoritmos para cada etapa), cujos resultados foram obtidos automaticamente, por meio de simulação em massa a partir do arquivo *script*. Os métodos com melhores desempenhos foram selecionados para compor a etapa de diagnóstico de falta do relé modelado;
6. Modelagem das características de operação mho e quadrilateral com duas zonas de atuação;
7. Avaliação comparativa do relé modelado em relação: i) ao modelo de relé disponibilizado no simulador; ii) a um relé real conectado em malha fechada. Foram comparados o tempo de *trip*, a classificação e localização da falta, e a zona de atuação.

## 1.6. Produção Intelectual

### 1.6.1. Publicações Diretas

1. COSTA, C. A. B.; BRITO, N. S. D.; SOUZA, B. A. Real-Time Evaluation of Impedance-Based Fault Location Algorithms. In: *IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, Curitiba, Brasil, 2016.
2. COSTA, C. A. B.; BRITO, N. S. D.; SOUZA, B. A. Avaliação do uso de um simulador em tempo real no diagnóstico de faltas de linhas de transmissão de energia elétrica. In: *Conferência Brasileira de Automática (CBA)*, Vitória, Brasil, 2016.

### 1.6.2. Publicações Correlatas

1. COSTA, C. A. B.; BRITO, N. S. D.; VERAS, B. P. M. S.; NEVES, W. L. A.; MORAES, S. R. D. Proposição de uma Metodologia para Geração de Registros Oscilográficos. In: *Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica (CBQEE)*, Campina Grande, Brasil, 2015.
2. LOPES, F. V.; BARROS, D.; REIS, R.; COSTA, C.; NASCIMENTO, J.; BRITO, N.; NEVES, W.; MORAES, S. Influência de Métodos de Estimação Fasorial no Processo de Análise de Falhas no Sistema CHESF. In: *Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia Elétrica (CBQEE)*, Campina Grande, Brasil, 2015.
3. LOPES, F. V.; BARROS, D.; NASCIMENTO, J.; REIS, R.; COSTA, C.; BRITO, N.; NEVES, W.; MORAES, S. Avaliação Preliminar de Aplicativo para Diagnóstico de Perturbações no Sistema CHESF de Transmissão. In: *Encuentro Regional Iberoamericano del CIGRE (ERIAC)*, Puerto Iguazú, Argentina, 2015.
4. LOPES, F. V.; BARROS, D.; REIS, R.; COSTA, C.; NASCIMENTO, J.; BRITO, N.; NEVES, W.; MORAES, S. Disturbance Analysis and Protection Performance Evaluation. In: *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Cavtat, Croatia, 2015.
5. LOPES, F. V.; BARROS, D.; COSTA, C.; NASCIMENTO, J.; REIS, R.; BRITO, N.; NEVES, W.; MORAES, S. Localização de Falhas em Linhas de Transmissão Usando Dados Não-Sincronizados de Dois Terminais: Revisão e Avaliação de Técnicas. In: *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, Natal, Brasil, 2016.

## 1.7. Organização da Dissertação

Além deste capítulo introdutório, a dissertação apresenta cinco capítulos organizados da seguinte forma:

- Capítulo 2: apresentação da revisão bibliográfica referente ao uso de ferramentas computacionais para o desenvolvimento de modelos de relés;
- Capítulo 3: apresentação dos fundamentos da proteção de distância, da descrição das etapas de um diagnóstico de falta e dos métodos avaliados;
- Capítulo 4: apresentação dos detalhes da modelagem do sistema-teste e da implementação dos algoritmos avaliados, utilizando as ferramentas do *software* RSCAD/RTDS®;
- Capítulo 5: apresentação/discussão dos resultados;
- Capítulo 6: apresentação das conclusões e propostas para trabalhos futuros.

# Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica

Análise criteriosa do estado da arte relativa ao tema revelou que é crescente o uso de simuladores no desenvolvimento de modelos de relés. Análise crítica dos artigos considerados mais relevantes para o estudo realizado neste trabalho são apresentados a seguir.

## 2.1. Análise dos Artigos mais Relevantes

Segundo APOSTOLOPOULOS & KORRES (2010), o acesso que alguns fabricantes de relés permitiram aos seus algoritmos e características de projetos por meio dos seus manuais, possibilitou o desenvolvimento de modelos realistas para avaliação dos algoritmos de proteção e ajustes de configuração de relés.

KEZUNOVIC & KASZTENNY (1999) apresentaram uma alternativa para modelar, projetar, otimizar e testar relés digitais. Os autores desenvolveram cinco bibliotecas no SIMULINK/MATLAB<sup>®1</sup> que, combinadas, formam um modelo genérico de relé. Cabe ao usuário ajustar parâmetros e conexões nos blocos desenvolvidos, de acordo com a função desejada (sobrecorrente, distância e diferencial). Esse modelo apresenta a vantagem de processar sinais provenientes da biblioteca de sinais de entrada, do *Power System Blockset*, de arquivos de saída do ATP (*Alternative Transient Program*) e arquivos no formato COMTRADE.

---

<sup>1</sup> Uma das ferramentas mais reconhecidas mundialmente é o pacote de *software* MATLAB<sup>®</sup>, utilizado para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos. O SIMULINK<sup>®</sup> é um ambiente de diagrama de blocos para simulação em tempo contínuo ou discreto, integrado ao MATLAB<sup>®</sup>. Ele oferece uma vasta seleção de bibliotecas que permitem a simulação do *hardware* e *software* de um relé.

WU *et al.* (2005) propuseram uma metodologia para modelagem de um relé digital de distância utilizando apenas o *software* MATLAB®. Segundo os autores, o MATLAB® é uma plataforma poderosa para esse tipo de tarefa, haja vista sua *interface* amigável e linguagem de programação simples. O modelo inclui as etapas de detecção, classificação e cálculo de impedância de falta, que foram todas implementadas em linha de código. Os recursos apontados pelos autores incluem armazenamento dos dados da simulação, alteração automática dos parâmetros da simulação e visualização da trajetória da impedância e dos sinais de corrente e tensão do SEP. A validação do modelo foi realizada via simulações de falta em um SEP modelado no SIMULINK®.

APOSTOLOPOULOS & KORRES (2010) propuseram um relé desenvolvido de forma modular (cada parte do *hardware* e *software* do relé é implementada como uma função separadamente), utilizando blocos e bibliotecas de processamento de sinais disponíveis no SIMULINK®. No trabalho, é proposto um ambiente constituído pelo MATLAB®/SIMULINK® e RTDS® para simulação em tempo real, análise e validação do modelo de um relé digital.

Uma desvantagem observada foi que a metodologia adotada requer o uso de dois computadores: em um deles, instala-se o MATLAB® e seu pacote de execução em tempo real, além de uma placa de aquisição de dados (PAD); no outro, instala-se o *software* RSCAD/RTDS®. A comunicação entre as duas ferramentas foi feita por meio das saídas analógicas e entradas digitais do RTDS® e da PAD, proporcionando um ambiente de simulação em malha fechada. As funções de proteção implementadas foram as de distância e sobrecorrente. A validação do modelo foi realizada via simulação de diversos cenários de falta.

MREHEL *et al.* (2013) descreveram um modelo de relé de distância implementado no SIMULINK®, cujas funcionalidades incluem detecção de falta, cálculo da impedância e coordenação das zonas de proteção, as quais foram implementadas separadamente a partir do *toolbox* SimPowerSystem. Uma das vantagens apontadas pelos autores é que

esse modelo identifica as fases envolvidas na falta e calcula a impedância aparente e o local de falta de forma precisa.

CAMPOS *et al.* (2008) utilizaram os blocos disponíveis no SIMULINK® para implementar um relé de sobrecorrente de tempo inverso, o que reduz o tempo e esforço no desenvolvimento do algoritmo. Os autores, porém, não se limitaram a utilizar o algoritmo no SIMULINK®. Após sua implementação, o mesmo foi carregado em um DSP (*Digital Signal Processor*) para sua validação, utilizando *toolboxes* do MATLAB® que geram um código compatível para o DSP. O modelo possui uma técnica para cálculo rápido das tensões e correntes de pico e um fator de compensação de inércia de disco, caso sejam incluídos relés eletromecânicos. Segundo os autores, o tempo de detecção é rápido, o que torna o modelo confiável.

GOH *et al.* (2010) também propuseram um relé de sobrecorrente implementado no SIMULINK®. Diferentemente de CAMPOS *et al.* (2008), além de implementarem o modelo desenvolvido no SIMULINK® em um DSP, os autores também programaram o relé de sobrecorrente em linguagem C no processador. Ambos os casos foram testados e comparados com resultados apresentados pelo padrão IEC 255-3, obtendo-se diferenças muito pequenas. As vantagens apontadas pelos autores para a programação diretamente no DSP são a maior precisão no tempo de operação e necessidade de uma menor alocação de memória.

Outra ferramenta utilizada na implementação de relés de proteção é o LabVIEW, que apresenta linguagem de programação gráfica, simplificando a visualização, criação e desenvolvimento de códigos para sistemas de engenharia (NATIONAL INSTRUMENTS, 2016).

GRIMONI *et al.* (2010) apresentaram a implementação de um algoritmo de proteção de sobrecorrente de tempo inverso em plataforma LabVIEW para fins didáticos. Para validar o relé, foi montado um arranjo experimental com variac e um transformador de corrente. Os sinais foram recebidos pelo computador por meio de uma placa de condicionamento de sinais. Como vantagens os autores destacaram a

programação gráfica, sua alta qualidade em ferramentas de *interface* com o usuário, a facilidade de aquisição e tratamento de dados e atuação em periféricos por meio das saídas digitais. Como desvantagem, os autores apontaram os erros de precisão nos cálculos, visto que eles utilizam um *hardware* que não trabalha em tempo real e o intervalo de tempo entre as aquisições de dados é pequeno, o que pode comprometer o desempenho do sistema de proteção.

A linguagem JAVA também tem sido utilizada para desenvolver modelos de relés. Ela é a base para praticamente todos os tipos de aplicações em rede, sendo o padrão global para o desenvolvimento e distribuição de aplicações móveis e incorporadas, jogos, conteúdo baseado na Web e *softwares* corporativos (JAVA, 2016).

SILVA (2011) desenvolveu um sistema para capacitação presencial e à distância de profissionais e estudantes na área de PSE. Esse sistema consistiu em um simulador, desenvolvido com a linguagem JAVA, que incluiu diagramas unifilares com a representação dos principais componentes do sistema de proteção. As funções implementadas foram as de sobrecorrente temporizada e instantânea, cujos ajustes foram feitos pelos usuários. A partir dos ajustes dos relés, o *software* gerou um coordenograma, a partir do qual o usuário verifica a coordenação da proteção. As vantagens apontadas pelo autor da linguagem JAVA incluem a portabilidade, a orientação a objetos, fácil extensibilidade, o fato de ser *open-source* e a comunidade ativa facilitando o desenvolvimento de *software*.

Outra linguagem de programação muito utilizada nos estudos dos SEP é a linguagem MODELS, que permite a representação e simulação de componentes e sistemas de controle que não podiam ser representados utilizando os elementos do EMTP (*Eletromagnetic Transient Program*) e os blocos de controle disponíveis no TACS (*Transient Analysis of Control Systems*) (DUBÉ & BONFANTI, 1992).

HEO *et al.* (2003) apresentaram um modelo de relé de distância desenvolvido com a linguagem MODELS, cujas entradas são os sinais de tensão e corrente do SEP modelado no EMTP. Esse relé apresenta um módulo para processamento de sinais e

outro para detecção da falta, que determina as fases envolvidas, calcula a impedância aparente e determina a zona de atuação para enviar o sinal de *trip*, caso necessário. Segundo os autores, apesar de o EMTP não ser capaz de executar simulação em tempo real, o método desenvolvido permite examinar de perto as operações internas de um relé, facilitando a identificação de problemas no algoritmo.

JANÍČEK & MUCHA (2006) utilizaram a linguagem MODELS e o recurso da *foreign model* para realizar a interação entre o modelo de relé desenvolvido na linguagem C++ e o SEP modelado no ATP. Os autores justificaram que a linguagem MODELS é simples, não sendo suficiente para o desenvolvimento de modelos sofisticados, diferentemente de uma linguagem de programação orientada a objetos. O relé incluiu as etapas de amostragem de sinais, filtragem digital, processamento dos sinais e as funções de distância e de sobrecorrente. Como desvantagem, é possível citar o uso de mais de um ambiente de simulação, o que pode ocasionar erros na troca de informações.

O RTDS® se mostra como uma alternativa para a realização de simulações em tempo real, com a vantagem de incluir tanto a modelagem do SEP como a do relé em um mesmo ambiente de simulação, além de permitir a conexão com equipamentos externos para a validação do modelo implementado. As desvantagens desse simulador apresentadas por HEO *et al.* (2003) incluem o seu custo elevado e o espaço físico ocupado pelo seu *hardware*.

OUELLETTE *et al.* (2004) propuseram uma metodologia para modelagem de um relé de impedância utilizando o RTDS®, em particular, o *software* RSCAD, que permite a simulação automática por meio de um *script* desenvolvido pelo usuário. O SEP e os módulos para amostragem de sinal, estimação fasorial e cálculo de impedância foram desenvolvidos com componentes disponíveis na ampla biblioteca do RSCAD. A grande vantagem dessa metodologia é a utilização de uma ferramenta que proporciona um ambiente de simulação realístico e consistente. Porém, os autores não incluíram as etapas de detecção e classificação de falta.

MEER (2008) e SARAN (2009) apresentaram modelos de relés de sobrecorrente desenvolvido no RTDS® para estudo de coordenação de proteção com relés reais. Ambos realizaram a modelagem a partir de componentes da biblioteca do *software*. Para economizar no tempo de cálculo, MEER (2008) considerou apenas as grandezas de sequência zero. Assim, apenas a direção de corrente de faltas do tipo fase-terra pôde ser determinada corretamente. Ambos os autores realizaram testes de coordenação de proteção com relés reais, aproveitando que o RTDS® permite a conexão com equipamentos externos.

GUERRERO (2011) modelou um relé de distância para avaliação de esquemas de teleproteção. As etapas de estimação fasorial e cálculo das componentes simétricas foram implementadas pelo próprio autor por meio do módulo *CBUILDER*. A etapa de cálculo da impedância aparente e os circuitos de teleproteção foram modelados com componentes disponíveis na biblioteca do *software*. A validação do modelo foi realizada por meio de simulações de faltas no RTDS® em malha fechada com um relé digital.

COUTINHO (2012) também modelou um relé de distância no RTDS®, porém com foco na etapa de estimação fasorial e lógica de proteção. O modelo implementado, por ser aberto, permitiu a avaliação de diferentes algoritmos de estimação fasorial modelados pelo autor por meio do módulo *CBUILDER*, e também a modelagem da lógica de proteção utilizando a característica *mho* por comparador de fase e por zonas. Para avaliação de desempenho dos algoritmos, o autor utilizou o recurso da simulação em massa e a conexão com um relé digital.

O relé modelado neste trabalho utiliza apenas o RTDS® como ferramenta de simulação e diferentemente dos trabalhos mencionados anteriormente, o relé possui além da função de proteção de distância, a etapa de diagnóstico da falta, informando o tempo de *trip*, de detecção, a zona de atuação, a classificação e a localização da falta.

## 2.2. Síntese Bibliográfica

Uma síntese dos artigos analisados na seção anterior é apresentada na Tabela 2.1. Ao final, constatou-se que:

- O uso de simuladores na construção de modelos de relés é uma prática muito utilizada para estudos de PSE por permitirem um ambiente seguro e confiável para o desenvolvimento e implementação de algoritmos de proteção e simulação de faltas em SEP;
- A maioria dos autores optou pelo uso do MATLAB®/SIMULINK como ferramenta de simulação;
- Apesar de apresentar boa *interface* gráfica e possibilidade de simulação em massa, a modelagem de relés no MATLAB®/SIMULINK limita-se a SEP de pequeno porte;
- Apesar do seu grande potencial, o uso da linguagem MODELS na construção de modelos de relés não é atrativo, visto que programas como ATP e EMTP não simulam em tempo real;
- O RTDS® é sem dúvida, o simulador com maior potencial para construção de modelos de relés, devido dentre outras vantagens: a vasta biblioteca de componentes disponíveis, *interface* amigável e por permitir a emulação do SEP na condição em tempo real de operação.

Por tudo isso, o RTDS® foi o simulador escolhido para a modelagem do relé apresentado neste trabalho.

Tabela 2.1 - Síntese bibliográfica.

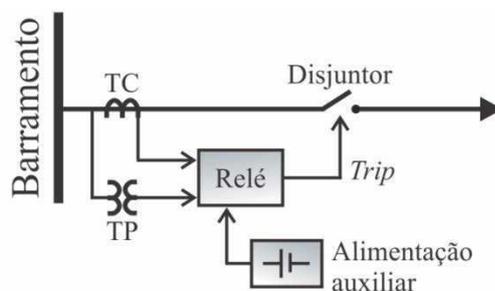
Referência	Ferramenta computacional	Características
KEZUNOVIC & KASZTENNY (1999) WU <i>et al.</i> (2005) APOSTOLOPOULOS & KORRES (2010) MREHEL <i>et al.</i> (2013) CAMPOS <i>et al.</i> (2008) GOH <i>et al.</i> (2010)	MATLAB® SIMULINK	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Apresenta pacote de execução em tempo real;</li> <li>- Permite visualização gráfica das respostas;</li> <li>- Desenvolvimento do algoritmo de forma mais rápida por causa da programação visual;</li> <li>- É possível carregar o modelo em um DSP;</li> <li>- <i>Interface</i> amigável e linguagem de programação simples;</li> <li>- Limitações no tamanho do SEP modelado, devido ao processamento.</li> </ul>
GRIMONI <i>et al.</i> (2010)	LabVIEW	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Linguagem de programação gráfica;</li> <li>- Modelagem em blocos;</li> <li>- Facilidade de visualização dos resultados;</li> <li>- Não simula em tempo real;</li> </ul>
SILVA (2011)	JAVA	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Orientação a objetos;</li> <li>- Fácil extensibilidade;</li> <li>- <i>Open source</i>;</li> <li>- Não é uma ferramenta específica para modelagem de componentes de um SEP.</li> </ul>
HEO <i>et al.</i> (2003)	MODELS	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Os programas que utilizam a linguagem MODELS não realizam simulação em tempo real;</li> </ul>
JANÍČEK & MUCHA, (2006)	C++	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permite desenvolvimento de modelos complexos;</li> <li>- Necessita de ambiente para simulação do SEP.</li> </ul>
OUELLETTE <i>et al.</i> (2004) MEER (2008) SARAN (2009) GUERRERO (2011) COUTINHO (2012) COSTA (2016)	RTDS®	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simulação em tempo real;</li> <li>- Conexão com equipamentos externos;</li> <li>- Vasta biblioteca de componentes;</li> <li>- Simulação do SEP e modelagem do relé em um mesmo ambiente;</li> <li>- Permite visualização da resposta para cada etapa da modelagem;</li> <li>- Custo elevado;</li> <li>- Necessita de espaço físico apropriado;</li> <li>- Limitação de <i>hardware</i>.</li> </ul>

# Capítulo 3 - Fundamentação Teórica

Um sistema de proteção é definido como sendo o conjunto de equipamentos e acessórios destinados a realizar a proteção para curtos-circuitos e para outras condições de operação anormais em componentes do SEP (ONS, 2008). Seu objetivo é assegurar a continuidade do fornecimento de energia elétrica aos usuários, bem como salvaguardar o material e as instalações do SEP, atuando de forma rápida e precisa.

Um diagrama de um sistema de proteção típico é apresentado na Figura 3.1, cujo princípio de funcionamento pode ser descrito da seguinte forma: os transformadores para instrumentos (transformadores de corrente (TC) e de potencial (TP)) reduzem as amplitudes das grandezas necessárias à função de proteção (corrente e/ou tensão) para níveis aceitáveis de leitura e acesso seguro. Em seguida, essas informações são disponibilizadas ao relé, que se encarrega de processá-las. Caso os valores das grandezas excedam valores pré-definidos, os contatos do relé são fechados e neste instante, a bobina de abertura do disjuntor, alimentada por uma fonte auxiliar, é energizada abrindo os contatos principais do disjuntor (SÁ *et al.*, 2010). Uma definição sucinta de cada elemento é apresentada seguir.

Figura 3.1 - Diagrama de um sistema de proteção típico (Fonte: autoria própria).



**Disjuntor:** dispositivo de manobra (mecânico) e de proteção capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes em condições normais do circuito, assim como

estabelecer, conduzir por tempo especificado e interromper correntes em condições anormais especificadas do circuito, tais como as de curto-circuito (ABNT, 1987). O comando de abertura desse equipamento é feito pelo relé.

**Transformador de Corrente (TC):** equipamento destinado a reproduzir a corrente do seu circuito primário de forma proporcional no seu circuito secundário, mantendo a mesma fase. Ele é utilizado para alimentar instrumentos de medição, controle ou proteção, cuja corrente é muito baixa em relação à nominal do SEP. Além disso, também promove a isolação elétrica entre o instrumento e o SEP (KINDERMANN, 1999).

**Transformador de Potencial (TP):** equipamento utilizado para alimentar instrumentos de medição, controle ou proteção, além de isolar eletricamente os instrumentos do SEP. Para isso, reproduz no seu secundário uma tensão proporcional à tensão na LT do SEP (KINDERMANN, 1999). Os TP podem ser do tipo capacitivo (TPC) ou indutivo (TPI).

**Relé:** dispositivo elétrico que tem como objetivo produzir modificações súbitas e predeterminadas em um ou mais circuitos elétricos de saída, quando certas condições são satisfeitas nos circuitos de entrada que controlam os dispositivos (ELETROBRAS, 2015).

Além desses elementos, também constituem um sistema de proteção os equipamentos de teleproteção, circuitos de alimentação e circuitos de comando e sinalização.

Todo sistema de proteção deve obedecer aos requisitos da Filosofia da Proteção, que é o termo usado para significar a ciência, bem como o funcionamento dos dispositivos de proteção, dentro de uma estratégia controlada, para maximizar a continuidade de serviço e minimizar os danos à propriedade pessoal devido a um comportamento anormal no SEP (ANDERSON, 1999). Basicamente, a filosofia da proteção consiste em selecionar, coordenar, ajustar e aplicar os vários equipamentos e dispositivos protetores a um SEP, de forma a guardar entre si uma determinada

relação, tal que uma anormalidade no SEP possa ser isolada e removida, sem que outras partes sejam afetadas (GUIGUER, 1988). De modo a atender a esses requisitos, a filosofia da proteção segue os seguintes objetivos (COURY, 2011):

**Confiabilidade:** o relé deve operar somente em condições para as quais foi projetado.

**Sensibilidade:** o relé deve responder às anormalidades nas condições de operação e aos curtos-circuitos para os quais foi projetado.

**Seletividade:** o relé deve isolar a menor porção possível do sistema, permitindo uma adequada operação do sistema remanescente.

**Velocidade de atuação:** o relé deve remover uma situação de falta o mais rápido possível, de modo a diminuir a extensão do dano ocorrido e o tempo total de desabastecimento dos consumidores.

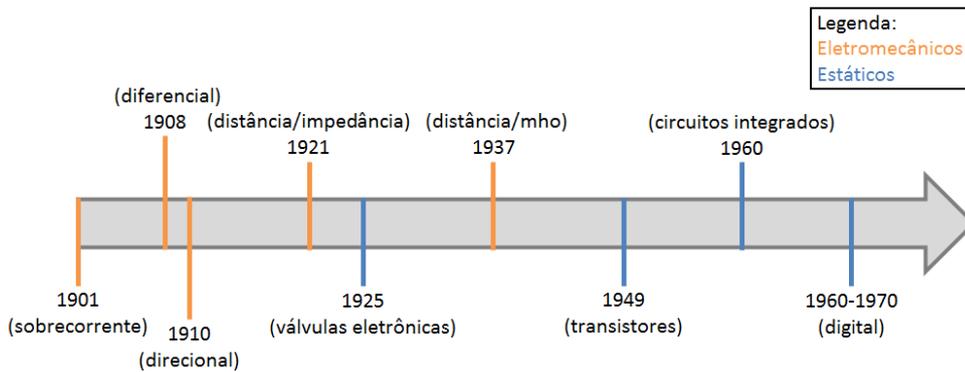
### 3.1. O Relé Digital

O relé é considerado o elemento mais importante de um sistema de proteção. Historicamente, o princípio de funcionamento dos relés foi estabelecido no início do século XIX, quando surgiram os primeiros relés do tipo eletromecânicos, formados por uma bobina que, quando energizada, atraía uma armadura móvel que abria ou fechava um conjunto de contatos do relé, fazendo-o atuar. Os avanços tecnológicos do século XX permitiram o desenvolvimento de novos tipos de relés, dentre os quais destacam-se os: i) relés estáticos (ausência de movimentos mecânicos) ou de estado sólido, constituídos por dispositivos semicondutores; ii) relés digitais, gerenciados por microprocessadores, cujo controle é realizado por um *software*, onde os dados de entradas são digitalizados (COURY, 2011).

Atualmente, a supremacia é dos relés digitais, que estão substituindo gradativamente, os relés eletromecânicos em um processo irreversível. Com os relés

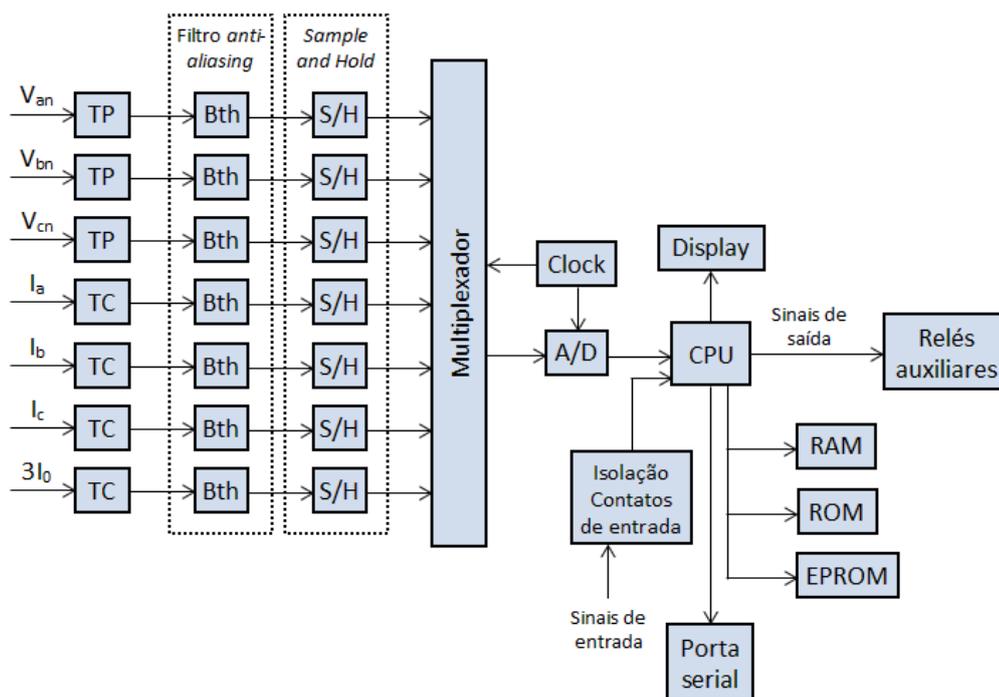
digitais, vários benefícios foram incorporados aos sistemas de proteção, tais como confiabilidade e possibilidade de programação de funções de proteção mais complexas (SILVA, 2012). A evolução temporal dessa história é apresentada de forma simplificada na Figura 3.2.

Figura 3.2 - Cronologia dos relés de proteção (Fonte: autoria própria).



O *hardware* de um relé digital típico é constituído por unidades ou subsistemas, com funções bem definidas, conforme mostrado na Figura 3.3 e explicados resumidamente a seguir.

Figura 3.3 - Principais subsistemas de um relé digital (Fonte: autoria própria).



**Unidade de condicionamento de sinais:** formada pelos: i) transformadores auxiliares, responsáveis por atenuarem as tensões e correntes de entrada para níveis adequados aos microprocessadores e garantirem isolamento galvânica entre os relés de proteção e os sinais provenientes dos TP e TC; ii) filtros *anti-aliasing* para evitar a ocorrência de sobreposição de espectro durante a amostragem dos sinais.

**Unidade de aquisição de dados:** formada pelo circuito *sample and hold*, multiplexador e conversor analógico/digital (A/D), digitaliza os sinais analógicos provenientes da unidade de condicionamento de sinais. Os dispositivos de *sample and hold* capturam e mantêm constante um sinal analógico durante um intervalo de tempo de amostragem, evitando variação do sinal durante o processo de conversão A/D. O multiplexador permite o uso de apenas um conversor A/D, que por sua vez, transforma o sinal analógico em uma palavra digital de 8 a 16 bits (SILVA, 2009).

**Unidade de processamento de dados:** controla o funcionamento do relé e extrai a componente fundamental. A partir da execução dos cálculos essa unidade decide se serão enviados sinais de comando para a abertura do disjuntor local e de disparo ou bloqueio para os relés nos terminais remotos.

**Unidade de memória:** armazena os valores das amostras, o *software* do relé, os parâmetros de ajuste e os dados da oscilografia<sup>2</sup>.

**Unidade de comunicação:** realiza a troca de informações com o relé, como ajustes de parâmetros e coleta de oscilografias. É constituída por porta serial ou *ethernet* (SILVA, 2009).

**Unidade de interface lógica:** consiste em um módulo de entrada lógica e saída digital. A entrada informa ao processador sobre os estados de chaves, disjuntores, seccionadores e atuação de outras proteções. O módulo de saída é responsável

---

<sup>2</sup> Registro das grandezas elétricas analógicas e digitais do sistema de potência, armazenados de forma automática ou manual nos relés digitais de proteção.

pelos sinais para atuação dos disjuntores e alarmes disparados pelo processamento (COURY, 2011).

## 3.2. Proteção de Distância

O relé de distância, definido pelo número 21 na Norma ANSI, tem como objetivo medir a impedância, admitância ou reatância de sequência positiva entre o ponto onde se encontra instalado e o ponto de falta, tomando como base as grandezas medidas pelos transformadores para instrumentos. Essa denominação se deve à proporcionalidade observada entre a impedância da LT e o seu comprimento. Na verdade, o relé não “vê” a distância propriamente dita, mas os parâmetros da LT ou do SEP (KINDERMANN, 1999).

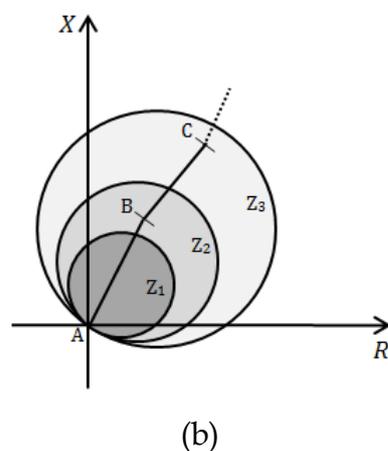
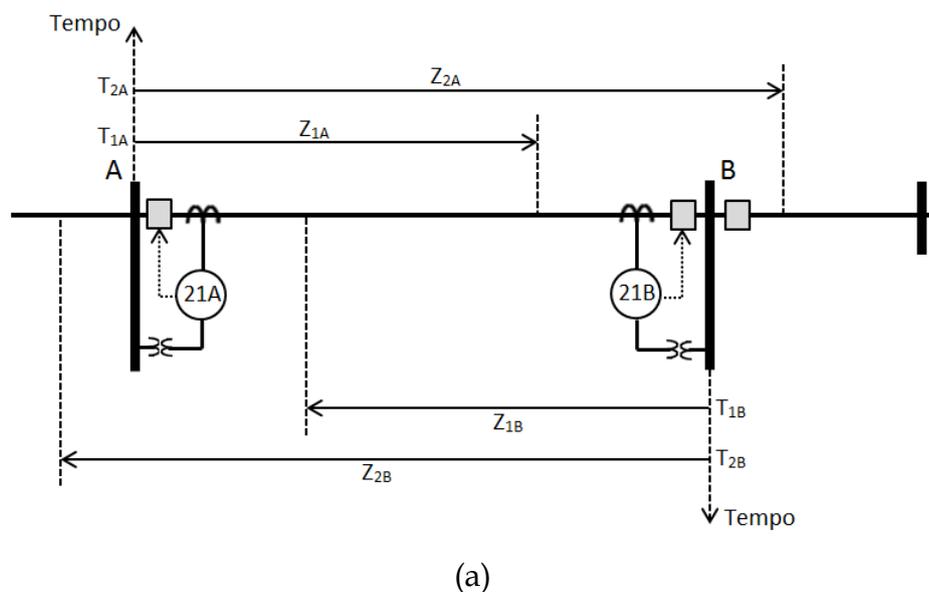
A representação da característica de operação dos relés de distância, bem como dos componentes do sistema, da resistência de falta e dos pontos de operação é realizada em um diagrama  $R-X$ , cujo eixo das abscissas representa a resistência e o eixo das ordenadas, a reatância. Esse diagrama permite analisar a aplicabilidade, o ajuste, a coordenação e o desempenho dos relés de distância (GONÇALVES, 2007).

A região de falta no plano complexo, denominada de zona de proteção, deve apresentar uma área substancial envolvendo a LT, com o objetivo de incorporar várias imprecisões decorrentes dos transdutores e dos cálculos do próprio relé, além da resistência de arco de falta. Os relés eletromecânicos utilizam zonas de atuação no formato circular, porém os digitais permitem formatos mais complexos (COURY, 2011). Detalhes sobre as características de operação de um relé de distância típico são apresentados adiante.

Como o desempenho do relé próximo ao limite da zona de proteção não é muito previsível, é necessário o uso de múltiplas zonas para cobrir com segurança a LT, garantindo as características de seletividade e coordenação. As zonas de proteção correspondem aos limites de atuação de um relé, sendo definidas por diferentes

alcances associados a diferentes tempos de atraso (SILVA, 2009). Na Figura 3.4, apresentam-se duas zonas de proteção de distância de uma LT e a característica mho de três zonas.

Figura 3.4 - Proteção de distância. (a) LT protegida; (b) Característica de operação mho de três zonas (Fonte: autoria própria).



A 1ª zona é definida como unidade de subalcance. Sua impedância de alcance corresponde a cerca de 80% ou 85% da impedância da LT protegida, e o seu tempo de atuação é instantâneo.

A 2ª zona de proteção cobre toda a LT protegida pela 1ª zona, mais 20% a 50% da menor LT adjacente ao seu terminal remoto. O seu tempo de atuação deve

contemplar o tempo de atuação da 1ª zona mais lenta das LT adjacentes mais o tempo de abertura do seu disjuntor, bem como o tempo do esquema para falha de disjuntor do barramento adjacente e uma margem de segurança. Por isso, seu atraso é de 200 a 500 ms em relação à 1ª zona.

Além dessas duas zonas, existe ainda uma 3ª zona, que tem como principal função a proteção de retaguarda para faltas ocorridas em LT adjacentes à LT protegida na 1ª zona (SILVA, 2009).

Atualmente, os relés de distância são os mais utilizados na proteção de devido principalmente, aos seguintes pontos LT (SILVA, 2009): i) a proteção de distância é pouco afetada pelas alterações nas impedâncias de curto-circuito das fontes de tensão equivalentes que podem ser estabelecidas nos terminais da transmissão sob análise e pelas condições de carga no momento da falta; ii) oferece a função de localização da falta, o que permite o retorno mais rápido à condição de operação normal do SEP em caso de defeitos permanentes (LIMA, 2006).

### **3.2.1. Características de Operação**

A partir do valor da impedância aparente, o relé determina a zona de proteção em que a falta ocorreu, de acordo com a característica de operação adotada. Tradicionalmente, a maior parte dos formatos das zonas é do tipo circular devido ao seu uso nos relés eletromecânicos, cujas equações de torque produzem uma vizinhança circular para as zonas de atuação. Entretanto, a tendência é o uso de outros formatos, visto que os relés digitais possibilitam o uso de formatos de zonas diferenciados.

Conforme o formato das zonas, os relés são classificados em quatro tipos: relés de impedância, relés de admitância ou mho, relés de reatância e relés quadrilaterais (COURY, 2011). Destacam-se aqui neste trabalho apenas as características mho e quadrilateral.

Outros conceitos importantes no estudo dos relés de distância são os de comparadores de fase e de módulo: a partir da comparação dos módulos e da defasagem entre dois sinais, distingue-se uma situação de operação normal de uma falta no SEP (SILVA, 2009).

### Característica mho

A característica de operação do tipo mho é a mais difundida, sendo aplicada desde os relés estáticos. Ela apresenta alcance finito, direcionalidade, menor sensibilidade às oscilações de potência e boa acomodação de resistência de faltas (SILVA, 2009).

Essa característica pode ser do tipo autopolarizada ou polarizada. A característica autopolarizada é denominada porque a grandeza de polarização utilizada nos comparadores é a própria tensão de entrada do relé. Os valores das tensões de operação  $\hat{V}_{op}$  e de polarização  $\hat{V}_{pol}$  para esse caso são definidos como (PAITHANKAR & BHIDE, 2007):

$$\hat{V}_{op} = -\hat{V}_R + Z_A \hat{I}_R \quad (3.1)$$

$$\hat{V}_{pol} = \hat{V}_R \quad (3.2)$$

Sendo:  $\hat{V}_R$  e  $\hat{I}_R$  os fasores de tensão e corrente medidos pelo relé, respectivamente;  $Z_A$  a impedância de alcance do relé, calculada por:

$$Z_A = \frac{hZ_{L1}}{\cos(\theta_{L1} - \tau)} \quad (3.3)$$

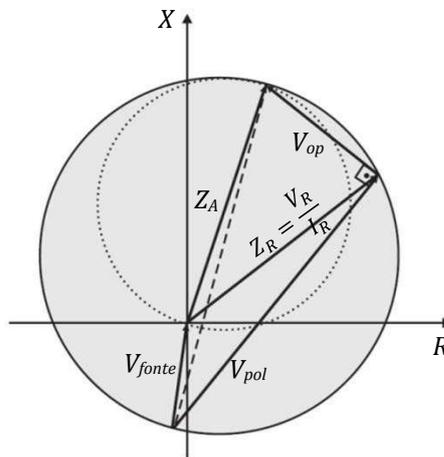
Sendo:  $h$  a porcentagem do comprimento da LT a ser protegida e  $\tau$  o ângulo de projeto da característica mho (ângulo de torque máximo do relé), que geralmente é ajustado para ser igual ao ângulo  $\theta_{L1}$  da LT.

A falta será detectada na zona de proteção, caso a diferença entre as fases da tensão de operação e de polarização esteja entre  $-90^\circ$  e  $90^\circ$ .

Para a característica mho polarizada, a tensão de polarização é a tensão  $\hat{V}_R$  adicionada a uma parcela de suplementação, que depende do tipo de polarização utilizada: cruzada ou por memória de tensão.

No caso da polarização por memória de tensão, a tensão memorizada empregada como sinal de polarização é a tensão pré-falta de sequência positiva. Essa polarização provoca uma expansão no diâmetro da característica envolvendo a origem, o que aumenta a confiabilidade quando a resistência de falta é baixa e o defeito encontra-se próximo ao ponto de instalação do relé, o que faz a tensão  $\hat{V}_R$  tender a zero (Figura 3.5). Porém, isso só ocorre para defeitos à jusante do relé. Para um defeito localizado na sua direção reversa, a característica de operação contrai-se, evitando operação indevida (SILVA, 2009). Por tudo isso, optou-se por implementar neste trabalho, a característica mho polarizada por memória de tensão de sequência positiva.

Figura 3.5 – Característica mho polarizada com falta na direção direta  
(Fonte: adaptado de SILVA (2009)).



### Característica quadrilateral

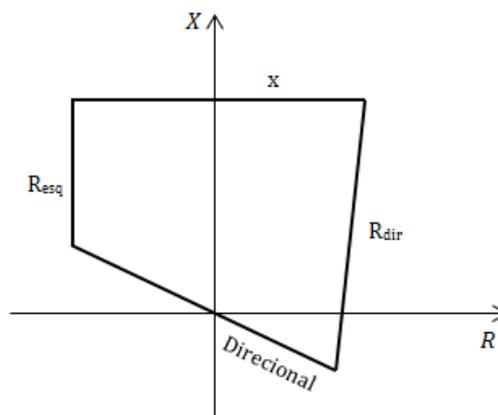
Diferentemente da característica mho, que pode ser implementada a partir de um único comparador, a característica quadrilateral tradicionalmente requer quatro comparadores, um para cada lado da característica (ROBERTS *et al.*, 1993). Em relação à mho, ela apresenta a vantagem de ter o alcance resistivo como parâmetro

de ajuste, o que permite acomodar a resistência de falta, ao invés de ser limitado pelo círculo mho. Isso a torna a mais adequada para proteção de LT curtas, uma vez que a resistência de falta pode ser da mesma ordem de magnitude da impedância da LT (CALERO *et al.*, 2010). Sua parametrização, por outro lado, é mais complexa.

Para implementação dessa característica, são necessários: um elemento direcional, um elemento de reatância e dois elementos resistivos (*blindings*). A unidade que determina: i) o alcance da impedância é o elemento de reatância  $X$ ; ii) a cobertura resistiva para faltas é o elemento de resistência do lado direito  $R_{dir}$ ; iii) a cobertura para fluxo de carga reverso é o elemento de resistência do lado esquerdo,  $R_{esq}$ .

Na prática, a unidade direcional é aplicada no processo de detecção das faltas em avanço. Os ajustes dessas unidades variam conforme o fabricante do relé. Uma representação dessa característica é mostrada na Figura 3.6.

Figura 3.6 - Característica quadrilateral (Fonte: autoria própria).



O fabricante de relés *Schweitzer Engineering Laboratories* (SEL) disponibiliza um roteiro de ajustes para o modelo SEL-311C, que foi utilizado neste trabalho, apresentando os procedimentos necessários para realizar os ajustes da característica quadrilateral, os quais são divididos entre os elementos de terra e de fase. Para os elementos de terra, os ajustes de reatância e de resistência são feitos conforme apresentado na Tabela 3.1. Para os elementos de fase, os ajustes de reatância e de resistência são feitos conforme apresentado na Tabela 3.2.

Em geral, a resistência à esquerda corresponde ao valor negativo ajustado para a resistência à direita. Deve-se observar também, o ângulo de correção de não homogeneidade, o que é feito identificando inicialmente, se o sistema é homogêneo. Caso negativo, determina-se o valor do ângulo de correção conforme apresentado no material da SEL.

O ajuste da unidade direcional também é feito de forma similar ao ajuste dos elementos da unidade de terra. Considera-se que o ângulo característico é, em geral, igual ao ângulo da impedância de sequência positiva da LT. Neste caso, são apresentados apenas os ajustes referentes às 1ª e 2ª zonas, porém, os ajustes para as demais zonas são feitos de forma semelhante à 2ª zona.

Tabela 3.1 - Ajustes de reatância e de resistência para os elementos fase-terra (SEL-311C).

Ajustes	1ª Zona	2ª Zona
<b>Reatância</b>	$XG1 = h_1 \cdot Z_{LT1} [\Omega]$ , $h_1$ : alcance da 1ª zona em p.u. $Z_{LT1}$ : impedância de sequência positiva da LT protegida.	$XG2 = h_2 \cdot Z_{LT1} [\Omega]$ , $h_2$ : alcance da 2ª zona em pu. $Z_{LT1}$ : impedância de sequência positiva da LT protegida.
<b>Resistência</b>	$RG1 = (1 - h_1) \cdot 20 \cdot X_{LT1} [\Omega]$ , $h_1$ : alcance da 1ª zona em pu. $X_{LT1}$ : reatância de sequência positiva da LT protegida.	$RG2 = RG1 \cdot XG2 / XG1 [\Omega]$ , $RG1$ : alcance resistivo da 1ª zona. $XG1$ : alcance de reatância da 1ª zona. $XG2$ : alcance de reatância da 2ª zona.

Tabela 3.2 - Ajustes de reatância e de resistência para os elementos fase-fase (SEL-311C).

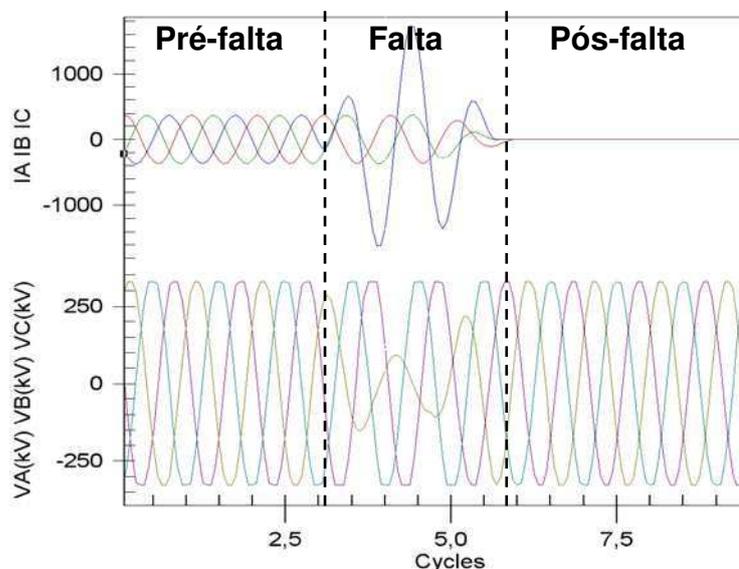
Ajustes	1ª Zona	2ª Zona
<b>Reatância</b>	$XP1 = h_1 \cdot Z_{LT1} [\Omega]$ , $h_1$ : alcance da 1ª zona em pu. $Z_{LT1}$ : impedância de sequência positiva da LT protegida.	$XP2 = h_2 \cdot Z_{LT1} [\Omega]$ , $h_2$ : alcance da 2ª zona em pu. $Z_{LT1}$ : impedância de sequência positiva da LT protegida.
<b>Resistência</b>	$RP1 = h_{R1} \cdot Z_{1LT} [\Omega]$ , $h_{R1}$ : alcance da 1ª zona para a característica de resistência em pu. $Z_{1LT}$ : impedância de sequência positiva da LT protegida.	$RP2 = h_2 \cdot XG2 [\Omega]$ , $h_2$ : alcance da 2ª zona em pu. $XG2$ : alcance de reatância da 2ª zona.

### 3.3. Diagnóstico da Proteção

A etapa de diagnóstico se dá logo após a consumação do distúrbio, na qual análise minuciosa é realizada, buscando descobrir suas causas, características e consequências. Ao final, medidas corretivas e/ou mitigadoras são propostas, visando obtenção de melhorias para o desempenho do SEP e da qualidade dos serviços públicos de energia elétrica. Dentre os vários distúrbios aos quais um SEP está sujeito, as faltas são sem dúvida, um dos eventos mais graves. Na prática, a ocorrência de uma falta em um SEP é resultante de eventos diversos, como por exemplo: desligamentos não programados dos seus componentes, rompimento de condutores, contato com vegetação.

De modo geral, em uma situação de falta identificam-se três períodos distintos, conforme ilustrado na Figura 3.7 (COSTA, 2010):

Figura 3.7 – Registro oscilográfico de uma falta com as indicações das etapas de pré-falta, falta e pós-falta (Fonte: autoria própria).



**Pré-falta:** compreende as amostras dos sinais referentes à situação de regime permanente do SEP, antes da ocorrência da falta.

**Falta:** corresponde ao período no qual o SEP encontra-se em uma situação de falta. Dependendo da natureza da falta e das condições elétricas do SEP, é comum o

surgimento de um aumento nas correntes e um afundamento nas tensões das fases envolvidas no curto-circuito.

**Pós-falta:** contém as amostras dos sinais após atuação da proteção.

O diagnóstico de uma falta é constituído de três etapas: detecção, classificação e localização. Análise do estado da arte mostrou que essa é uma área de pesquisa muito ativa, de modo que nos últimos anos, muitos métodos têm sido propostos. Neste trabalho, foram selecionados três métodos para cada etapa do diagnóstico, visando escolha do mais adequado para ser implementado no relé.

### 3.3.1. Detecção da Falta

A detecção do início de uma falta constitui uma etapa importante no processo de atuação do sistema de proteção, visto que a partir dela, o relé irá enviar o sinal de *trip* para abertura dos disjuntores. Além disso, os dispositivos de registro dos sinais oscilográficos entrarão no modo de gravação quando alguma anormalidade for detectada. Dentre os métodos propostos na literatura especializada para detecção das faltas foram avaliados três métodos, os quais são apresentados a seguir.

#### Método baseado na transformada de Park

No contexto da Engenharia Elétrica, a transformada de Park é uma ferramenta matemática que converte um sistema polifásico em um sistema ortogonal girante em sincronismo com a frequência do sistema original. O sistema ortogonal é composto de duas componentes, denominadas de componentes de eixo direto e de quadratura,  $A_d$  e  $A_q$ , respectivamente, que são calculadas conforme a seguir.

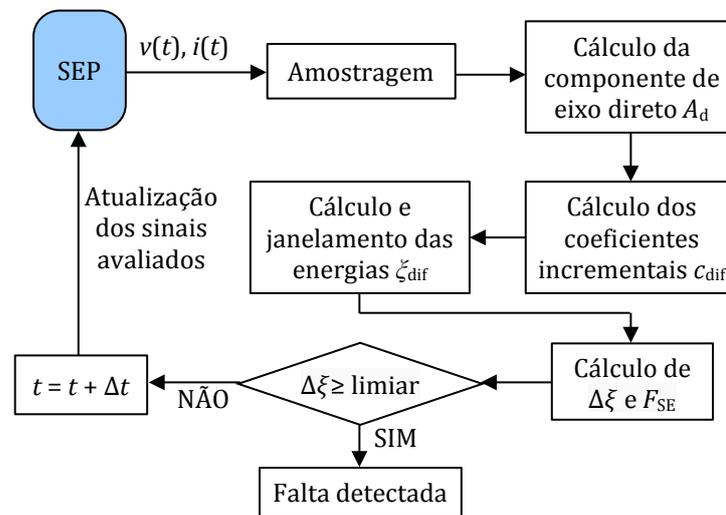
$$\begin{pmatrix} A_d(k) \\ A_q(k) \end{pmatrix} = P_{dq} \times \begin{pmatrix} A_a(k) \\ A_b(k) \\ A_c(k) \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

$$P_{dq} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos(\phi) & \cos(\phi - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\phi + \frac{2\pi}{3}) \\ -\text{sen}(\phi) & -\text{sen}(\phi - \frac{2\pi}{3}) & -\text{sen}(\phi + \frac{2\pi}{3}) \end{pmatrix}. \quad (3.5)$$

Sendo:  $A_{abc}$  os sinais trifásicos de tensão ou corrente;  $\phi = k\omega\Delta t + \theta$ ;  $\omega$  a frequência angular fundamental do SEP;  $\Delta t$  o período de amostragem;  $\theta$  o ângulo de fase da componente  $A_d$ .

Em 2013, LOPES *et al.* (2013) propuseram um método de detecção de faltas baseado no uso dessa transformada, o qual é apresentado de forma resumida na Figura 3.8, sendo aqui denominado de **Método TDQ**.

Figura 3.8 - Fluxograma do método de detecção TDQ (Fonte: autoria própria).



Os autores constataram que o uso apenas da componente de eixo direto  $A_d$  pode não ser suficiente para realizar a detecção, quando a impedância é elevada ou o ângulo de incidência é próximo de zero. Para contornar essa limitação e deixar o método mais robusto, incluíram o uso de grandezas incrementais das componentes de eixo direto,  $c_{dif}$ , e de suas energias janeladas,  $\xi_{dif}$ , as quais são calculadas utilizando uma janela de dados móvel no tempo, deslizando sobre os coeficientes  $c_{dif}$ . Esses parâmetros são calculados conforme a seguir.

$$c_{dif}(k) = A_d(k) - A_d(k - 1) \quad (3.6)$$

$$\xi_{dif}(k) = \sum_{n=k-\Delta k_{EN}+1}^k [c_{dif}(n)]^2. \quad (3.7)$$

Sendo:  $A_d(k)$  a  $k$ -ésima amostra da componente  $A_d$ ;  $c_{dif}(k)$  a  $k$ -ésima amostra das grandezas incrementais;  $\xi_{dif}(k)$  a energia da  $k$ -ésima janela de dados onde se encontram armazenados valores de  $c_{dif}$ ;  $\Delta k_{EN}$  o número de amostras utilizadas para o cálculo das energias.

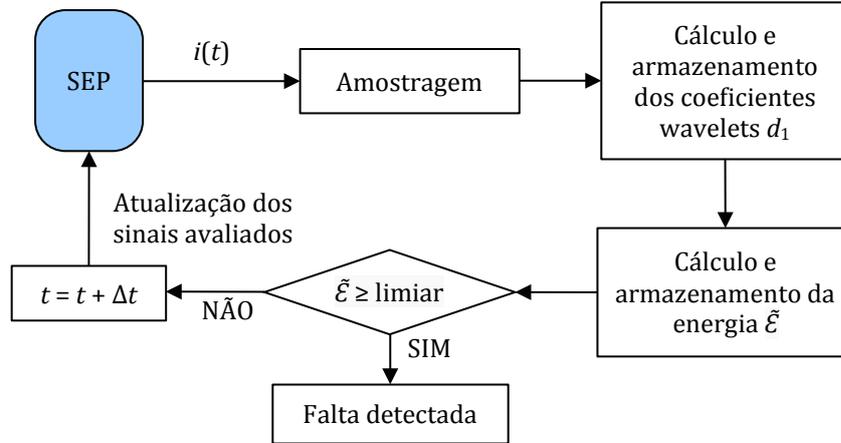
O método TDQ utiliza:

- Um limiar auto-adaptativo para detectar crescimentos abruptos nas energias  $\xi_{dif}$ , denominado de fator de sensibilidade da energia ( $F_{SE}$ ), o qual tem seus valores ajustados automaticamente, de acordo com os níveis de ruído elétrico e desbalanceamento durante o regime permanente do SEP. O  $F_{SE}$  é dado pela razão entre os valores máximo e mínimo globais das energias armazenadas em uma janela móvel no tempo.
- Uma janela deslizante para avaliar as amostras de energia. A detecção ocorre quando a razão entre a primeira e a última amostra de energia armazenada em uma dada janela seja maior que o limiar  $F_{SE}$  adicionado com uma margem de segurança ( $\eta_{SM}$ ).
- Apenas amostras atuais dos sinais de corrente e/ou tensão, ou seja, não armazena amostras em instantes passados, o que reduz consideravelmente, o esforço computacional.

### Método baseado na transformada wavelet

A transformada wavelet é uma ferramenta matemática que decompõe um sinal em diferentes faixas de frequência (também denominadas de escalas ou resoluções), por meio de operações de escalonamento e translação em uma função base (denominada de wavelet mãe). Dentre os vários métodos propostos na literatura, selecionou-se para análise o método proposto por COSTA *et al.* (2010), o qual é apresentado de forma resumida na Figura 3.9, sendo aqui denominado de **Método TW**.

Figura 3.9- Fluxograma do método de detecção TW (Fonte: autoria própria).



O método TW utiliza: i) apenas os sinais de corrente com os respectivos coeficientes wavelet; ii) apenas a 1ª escala de resolução; iii) a wavelet mãe Daubechies 4; iv) a versão discreta redundante, ou seja, não realiza a operação de dizimação pelo fator 2 (dois) durante o processo de decomposição. Os coeficientes wavelet são calculados conforme a seguir.

$$d_1(k) = \sum_{l=1}^L \tilde{h}(l)x(k+1-l) \quad (3.8)$$

$$\tilde{h}(1) = \frac{1-\sqrt{3}}{8}, \tilde{h}(2) = \frac{-3+\sqrt{3}}{8}, \tilde{h}(3) = \frac{3+\sqrt{3}}{8}, \tilde{h}(4) = \frac{-1-\sqrt{3}}{8}. \quad (3.9)$$

Sendo:  $k$  a amostra atual;  $l = 1, 2, \dots, L$ , em que  $L$  é o número de coeficientes do filtro wavelet;  $x$  o sinal de entrada (tensão ou corrente).

Conforme mostrado na Figura 3.9, o processo de detecção baseia-se no cálculo da energia janelada dos coeficientes wavelet ( $\tilde{E}_j$ ), da escala  $j$ , computada conforme a seguir.

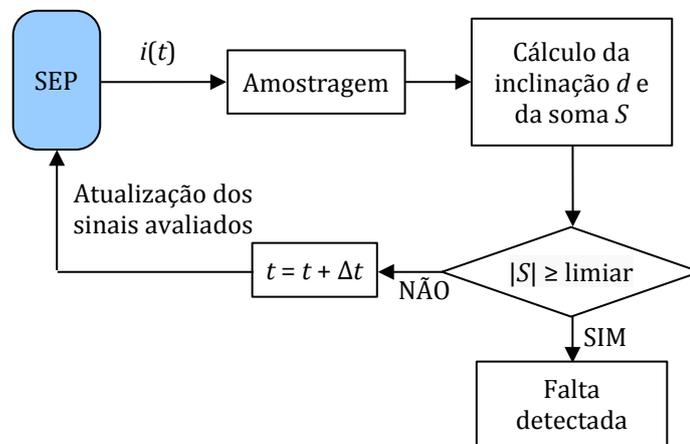
$$\tilde{E}_j(k) = \begin{cases} \sum_{n=1}^{\Delta k} \tilde{d}_j^2(n), & \text{se } 1 \leq k \leq \Delta k \\ \sum_{n=k-\Delta k+1}^{\Delta k} \tilde{d}_j^2(n), & \text{se } \Delta k < k \leq k_f \end{cases} \quad (3.10)$$

Sendo:  $k = \{1, 2, \dots, k_f\}$ ;  $\Delta k$  o tamanho da janela;  $k_f$  o número de amostras do sinal.

**Método baseado na inclinação do sinal de corrente**

Esse método foi proposto por NAGARAJU *et al.* (2011), que se basearam no monitoramento do cálculo do valor absoluto da soma das inclinações do sinal de corrente, em uma janela de um ciclo. Caso o valor obtido seja maior que um limiar predeterminado, uma falta é detectada. O método é apresentado de forma resumida na Figura 3.10, sendo aqui denominado de **Método INC**

Figura 3.10 – Fluxograma do método de detecção INC (Fonte: autoria própria).



A inclinação  $s$  e a soma  $S$  em um período são dadas por

$$s(k) = \frac{i(k) - i(k - 1)}{\Delta t} \tag{3.11}$$

$$S(k) = \sum_{l=(k-N+1)}^k s(l). \tag{3.12}$$

Sendo:  $s(k)$  a inclinação da corrente no instante  $k$ ;  $\Delta t$  o período de amostragem;  $S(k)$  a soma das inclinações em um período;  $N$  o número de amostras por ciclo;  $i(k)$  a amostra atual de corrente de uma fase.

A condição de falta é detectada caso o módulo de  $S(k)$  ultrapasse um limiar, que neste trabalho foi de 10% acima da soma das inclinações em um ciclo de regime permanente.

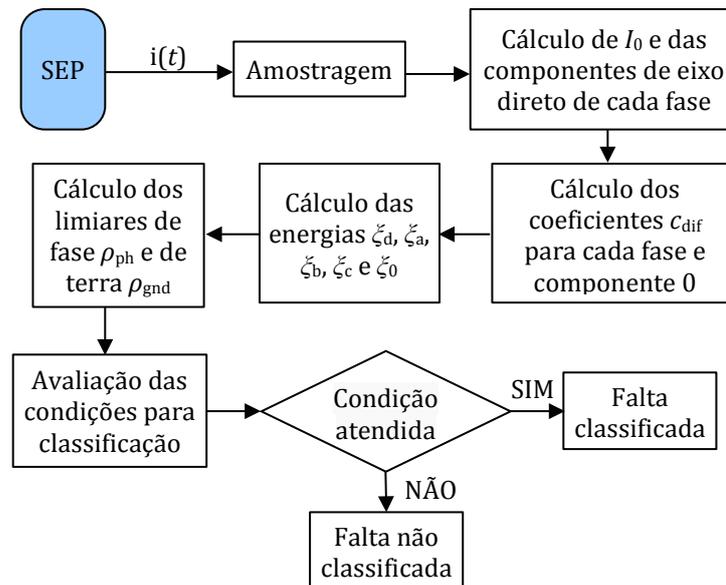
### 3.3.2. Classificação da Falta

A classificação da falta é a etapa que permite a identificação das fases envolvidas no evento. No caso da ocorrência de faltas em LT, dez tipos podem ocorrer: i) três faltas do tipo monofásica (AT, BT e CT); ii) três do tipo bifásica (AB, AC e BC); iii) três do tipo bifásica para terra (ABT, ACT e BCT); iv) a falta trifásica (ABC). Dentre os métodos propostos na literatura especializada para classificação das faltas, foram avaliados três métodos, os quais são apresentados a seguir.

#### Método baseado na transformada de Park

Esse método foi proposto por LOPES *et al.* (2014), o qual é apresentado de forma resumida na Figura 3.11, sendo aqui denominado de **Método TDQ**.

Figura 3.11 – Fluxograma do método de classificação TDQ (Fonte: autoria própria).



A classificação da falta é feita baseando-se no fato de que a amplitude da energia da fase envolvida no distúrbio aumenta. Caso esse aumento ocorra também na energia relacionada à componente de sequência zero, uma falta envolvendo a terra ocorreu. Essas amplitudes são comparadas com limiares de fase e terra,  $\rho_{ph}$  e  $\rho_{gnd}$ , respectivamente, para identificação da falta. A análise do método foi feita considerando  $\rho_{ph} = \xi_d/10$  e  $\rho_{gnd} = \xi_d/2000$  (LOPES *et al.*, 2014). O método TDQ requer

que a classificação não se realize nas primeiras amostras de falta, pois as janelas apresentam dados tanto do período de pré-falta quanto de falta. As faltas são classificadas conforme as condições apresentadas na Tabela 3.3.

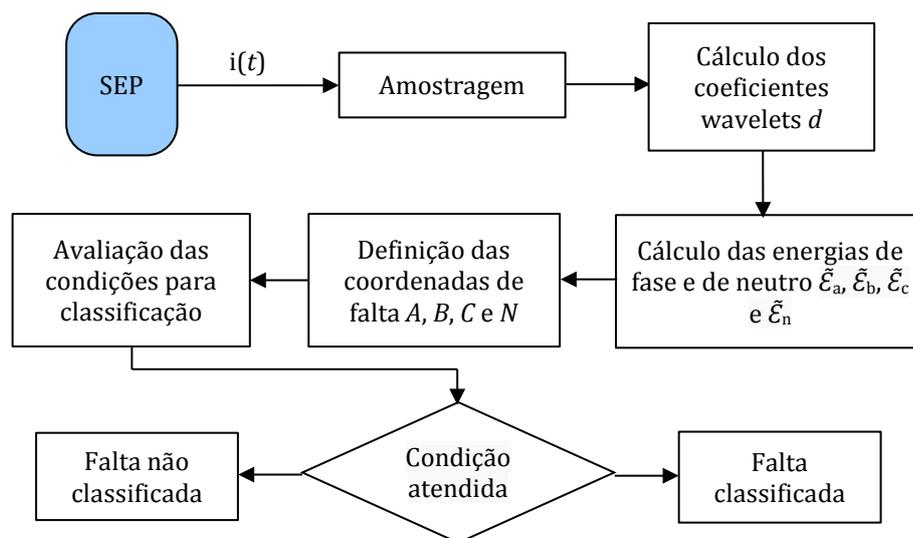
Tabela 3.3 - Classificação das faltas via método TDQ (LOPES *et al.*, 2014).

Condição	Tipo de falta
$\xi_a \geq \rho_{ph} \text{ E } \xi_b < \rho_{ph} \text{ E } \xi_c < \rho_{ph} \text{ E } \xi_0 \geq \rho_{gnd}$	AT
$\xi_a < \rho_{ph} \text{ E } \xi_b \geq \rho_{ph} \text{ E } \xi_c < \rho_{ph} \text{ E } \xi_0 \geq \rho_{gnd}$	BT
$\xi_a < \rho_{ph} \text{ E } \xi_b < \rho_{ph} \text{ E } \xi_c \geq \rho_{ph} \text{ E } \xi_0 \geq \rho_{gnd}$	CT
$\xi_a \geq \rho_{ph} \text{ E } \xi_b \geq \rho_{ph} \text{ E } \xi_c < \rho_{ph} \text{ E } \xi_0 < \rho_{gnd}$	AB
$\xi_a < \rho_{ph} \text{ E } \xi_b \geq \rho_{ph} \text{ E } \xi_c \geq \rho_{ph} \text{ E } \xi_0 < \rho_{gnd}$	BC
$\xi_a \geq \rho_{ph} \text{ E } \xi_b < \rho_{ph} \text{ E } \xi_c \geq \rho_{ph} \text{ E } \xi_0 < \rho_{gnd}$	CA
$\xi_a \geq \rho_{ph} \text{ E } \xi_b \geq \rho_{ph} \text{ E } \xi_c < \rho_{ph} \text{ E } \xi_0 \geq \rho_{gnd}$	ABT
$\xi_a < \rho_{ph} \text{ E } \xi_b \geq \rho_{ph} \text{ E } \xi_c \geq \rho_{ph} \text{ E } \xi_0 \geq \rho_{gnd}$	BCT
$\xi_a \geq \rho_{ph} \text{ E } \xi_b < \rho_{ph} \text{ E } \xi_c \geq \rho_{ph} \text{ E } \xi_0 \geq \rho_{gnd}$	ACT
$\xi_a \geq \rho_{ph} \text{ E } \xi_b \geq \rho_{ph} \text{ E } \xi_c \geq \rho_{ph} \text{ E } \xi_0 < \rho_{gnd}$	ABC

**Método baseado na transformada wavelet**

Esse método foi proposto por COSTA *et al.* (2012), o qual é apresentado de forma resumida na Figura 3.12, sendo aqui denominado de **Método TW**.

Figura 3.12 - Fluxograma do método de classificação TW (Fonte: autoria própria).



O método classifica as faltas a partir da análise da energia dos coeficientes wavelet das correntes de fase e de neutro. Os coeficientes e as energias são calculados

conforme apresentado na seção 3.3.1, considerando que o tamanho da janela é igual ao número de amostras em um ciclo. A partir dos valores da energia de cada sinal em uma dada amostra  $k$ , é possível definir as coordenadas de falta ( $A, B, C, N$ ), que serão utilizadas no processo de classificação, conforme a seguir.

$$A = \tilde{\epsilon}_{ia}/(\tilde{\epsilon}_{ia} + \tilde{\epsilon}_{ib} + \tilde{\epsilon}_{ic}) \quad (3.14)$$

$$B = \tilde{\epsilon}_{ib}/(\tilde{\epsilon}_{ia} + \tilde{\epsilon}_{ib} + \tilde{\epsilon}_{ic}) \quad (3.15)$$

$$C = \tilde{\epsilon}_{ic}/(\tilde{\epsilon}_{ia} + \tilde{\epsilon}_{ib} + \tilde{\epsilon}_{ic}) \quad (3.16)$$

$$N = \tilde{\epsilon}_{in}/(\tilde{\epsilon}_{ia} + \tilde{\epsilon}_{ib} + \tilde{\epsilon}_{ic}). \quad (3.17)$$

Sendo:  $A + B + C = 1$ ;  $0 \leq A \leq 1$ ;  $0 \leq B \leq 1$ ;  $0 \leq C \leq 1$ ;  $N \geq 0$ .

Além disso, foram adicionadas ao método informações relativas às energias dos coeficientes de aproximação das correntes ( $\tilde{\epsilon}_{ia}$ ,  $\tilde{\epsilon}_{ib}$ ,  $\tilde{\epsilon}_{ic}$  e  $\tilde{\epsilon}_{in}$ ) para correção da classificação da falta. Seus valores são obtidos de forma análoga às energias dos coeficientes wavelet. As faltas são classificadas conforme as condições apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Classificação das faltas via método TW (COSTA *et al.*, 2012).

Condição	Tipo de falta
$B < 1/3$ E $C < 1/3$ E $N > 0,1$	AT
$A < 1/3$ E $C < 1/3$ E $N > 0,1$	BT
$A < 1/3$ E $B < 1/3$ E $N > 0,1$	CT
$A > 1/3$ E $B > 1/3$ E $N < 0,1$	AB
$B > 1/3$ E $C > 1/3$ E $N < 0,1$	BC
$A > 1/3$ E $C > 1/3$ E $N < 0,1$	CA
$A > 1/3$ E $B > 1/3$ E $N > 0,1$	ABT
$B > 1/3$ E $C > 1/3$ E $N > 0,1$	BCT
$A > 1/3$ E $C > 1/3$ E $N > 0,1$	ACT
$A < 1/3$ E $B < 1/3$ E $N < 0,1$ OU $A < 1/3$ E $C < 1/3$ E $N < 0,1$ OU $B < 1/3$ E $C < 1/3$ E $N < 0,1$	ABC

Uma falta classificada como bifásica torna-se:

- Bifásica para terra quando:

$$\tilde{e}_{in} \geq 0,2 \frac{\tilde{E}_{ia} + \tilde{E}_{ib} + \tilde{E}_{ic}}{3}. \quad (3.18)$$

- Trifásica quando:

$$\tilde{e}_{ia} \geq 1,2\tilde{E}_{ia}, \quad (3.19)$$

$$\tilde{e}_{ib} \geq 1,2\tilde{E}_{ib}, \quad (3.20)$$

$$\tilde{e}_{ic} \geq 1,2\tilde{E}_{ic}. \quad (3.21)$$

Sendo:  $\tilde{E}_{ia}$ ,  $\tilde{E}_{ib}$  e  $\tilde{E}_{ic}$  os valores médios das energias dos coeficientes de aproximação das correntes de fase, em um ciclo pré-falta.

### Método baseado na sobrecorrente

Esse método foi proposto por ADU (2002), sendo aqui denominado de **Método SC**, e baseia-se na análise do crescimento da corrente na fase sob falta, em relação ao seu valor em regime permanente. As faltas são classificadas conforme as condições apresentadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Classificação das faltas via método SC (ADU, 2002).

Condição	Tipo de falta
$\Delta I_a > 0$ E $\Delta I_b < 0$ E $\Delta I_c < 0$ E $I_r > I_{limiar}$	AT
$\Delta I_a < 0$ E $\Delta I_b > 0$ E $\Delta I_c < 0$ E $I_r > I_{limiar}$	BT
$\Delta I_a < 0$ E $\Delta I_b < 0$ E $\Delta I_c > 0$ E $I_r > I_{limiar}$	CT
$\Delta I_a > 0$ E $\Delta I_b > 0$ E $\Delta I_c < 0$ E $I_r \leq I_{limiar}$	AB
$\Delta I_a < 0$ E $\Delta I_b > 0$ E $\Delta I_c > 0$ E $I_r \leq I_{limiar}$	BC
$\Delta I_a > 0$ E $\Delta I_b < 0$ E $\Delta I_c > 0$ E $I_r \leq I_{limiar}$	CA
$\Delta I_a > 0$ E $\Delta I_b > 0$ E $\Delta I_c < 0$ E $I_r > I_{limiar}$	ABT
$\Delta I_a < 0$ E $\Delta I_b > 0$ E $\Delta I_c > 0$ E $I_r > I_{limiar}$	BCT
$\Delta I_a > 0$ E $\Delta I_b < 0$ E $\Delta I_c > 0$ E $I_r > I_{limiar}$	ACT
$\Delta I_a > 0$ E $\Delta I_b > 0$ E $\Delta I_c > 0$ E $I_r \leq I_{limiar}$	ABC

Sendo:  $I_r$  o valor da corrente residual durante uma falta envolvendo a terra;  $I_{limiar}$  o valor de limiar, que neste trabalho foi adotado como 1 (um). Os valores de  $\Delta I_a$ ,  $\Delta I_b$  e  $\Delta I_c$  são obtidos por meio de:

$$\Delta I_a = |\hat{I}_a - \hat{I}_{a\_pre}| - THV \quad (3.22)$$

$$\Delta I_b = |\hat{I}_b - \hat{I}_{b\_pre}| - THV \quad (3.23)$$

$$\Delta I_c = |\hat{I}_c - \hat{I}_{c\_pre}| - THV. \quad (3.24)$$

Sendo:  $\hat{I}_{a\_pre}$ ,  $\hat{I}_{b\_pre}$  e  $\hat{I}_{c\_pre}$  os valores de corrente em regime pré-falta;  $THV$  é um limiar pré-estabelecido de valor maior do que a corrente de pré-falta.

Neste trabalho, foram considerados os fasores da frequência fundamental da corrente, obtidos pela transformada discreta de Fourier de ciclo completo (PHADKE & THORP, 2009).

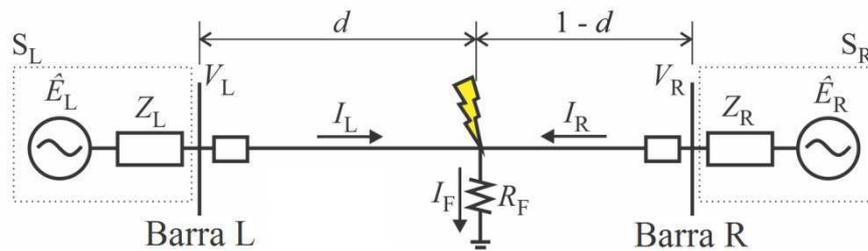
### 3.3.3. Localização da Falta

Após a ocorrência de uma falta, sua localização deve ser identificada de maneira rápida e a mais precisa possível, para que a equipe de manutenção possa recuperar a LT e, portanto, restabelecer o fornecimento de energia elétrica. Segundo TAKAGI *et al.* (1982), apesar das muitas vantagens dos métodos que usam informações de ambos os lados da LT, predominam os métodos que usam informações de apenas um terminal, devido à simplicidade. Neste caso, o modo tradicional baseia-se no cálculo da impedância aparente vista de um terminal da LT que junto com seus dados de impedância, fornece uma estimativa da distância da falta (KIMMERMAN & COSTELLO, 2004).

O problema de localização da falta utilizando dados de um terminal é descrito a seguir, considerando o diagrama unifilar de uma LT homogênea de comprimento  $l$ , como ilustrado na Figura 3.13. Os terminais local e remoto são representados pelas letras  $L$  e  $R$ , respectivamente. As tensões nos terminais são  $\hat{V}_L$  e  $\hat{V}_R$ . Quando uma falta

de resistência  $R_F$  ocorre a uma distância  $d$  por unidade da Barra L, a corrente de ambos os terminais,  $\hat{I}_L$  e  $\hat{I}_R$ , contribuem para a corrente total de falta  $\hat{I}_F$ . A LT tem impedância de sequência positiva  $Z_{LT1}$  entre os terminais L e R. Os equivalentes de Thévenin  $S_L$  e  $S_R$  representam os SEP conectados a cada terminal.

Figura 3.13 - Diagrama unifilar de uma LT com dois terminais (Fonte: autoria própria).



De acordo com a literatura especializada, a queda de tensão do terminal L é dada pela expressão:

$$\hat{V}_L = dZ_{LT1}\hat{I}_L + R_F\hat{I}_F, \quad (3.25)$$

na qual  $\hat{V}_L$  e  $\hat{I}_L$  dependem do tipo de falta e são substituídos de acordo com a Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Fasores utilizados para cada tipo de falta (DAS *et al.*, 2014).

Tipo de falta	$\hat{V}_L$	$\hat{I}_L$
AT	$\hat{V}_A$	$\hat{I}_A + K\hat{I}_0$
BT	$\hat{V}_B$	$\hat{I}_B + K\hat{I}_0$
CT	$\hat{V}_C$	$\hat{I}_C + K\hat{I}_0$
AB, ABT, ABC	$\hat{V}_{AB}$	$\hat{I}_{AB}$
BC, BCT, ABC	$\hat{V}_{BC}$	$\hat{I}_{BC}$
AC, ACT, ABC	$\hat{V}_{AC}$	$\hat{I}_{AC}$

Sendo:  $\hat{I}_0$  a corrente de sequência zero dada por (3.13), e  $K$  o fator de compensação residual dado por:

$$K = \frac{(Z_{LT0} - Z_{LT1})}{Z_{LT1}}. \quad (3.26)$$

O valor da impedância aparente  $Z_{ap}$  medida no terminal L é encontrada dividindo-se (3.25) pela corrente  $\hat{I}_L$ :

$$Z_{ap} = \frac{\hat{V}_L}{\hat{I}_L} = dZ_{LT1} + \frac{R_F \hat{I}_F}{\hat{I}_L}. \quad (3.27)$$

Como as únicas informações disponíveis são de um terminal da LT,  $R_F$  e  $\hat{I}_F$  não são conhecidos. Para eliminar essas duas variáveis desconhecidas, diferentes métodos foram desenvolvidos (DAS *et al.*, 2014). Este trabalho destaca três métodos que realizam a análise das componentes de frequência fundamental, utilizando dados de apenas um terminal da LT, os quais são apresentados a seguir.

### Método baseado na reatância simples

O método da reatância simples (IEEE, 2014), aqui denominado **Método RS**, ignora a parcela  $R_F \hat{I}_F / \hat{I}_L$ . Para isso, ele assume que a corrente na resistência de falta está em fase com a corrente no ponto de medição e que não há carregamento antes da falta, o que torna essa parcela um número real (Figura 3.14a). Além disso, o método considera apenas a parte imaginária da impedância aparente. A distância de falta, em p.u., é dada por:

$$d = \frac{\text{Im}\{\hat{V}_L / \hat{I}_L\}}{\text{Im}\{Z_{LT1}\}}. \quad (3.28)$$

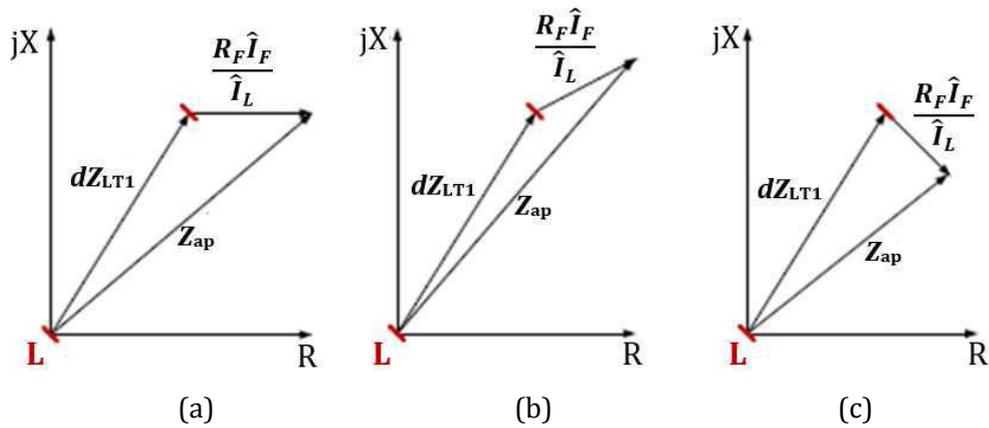
Sendo  $\hat{V}_L$  e  $\hat{I}_L$  dependentes do tipo de falta e usados de acordo com a Tabela 3.6.

Esse método tem a vantagem de ser facilmente implementado, porém, sua precisão é muito susceptível ao alinhamento de  $\hat{I}_F$  e  $\hat{I}_L$ . O erro na localização será zero apenas se a resistência de falta for zero ou se  $\hat{I}_F$  e  $\hat{I}_L$  estiverem em fase. Em sistemas não-homogêneos, as correntes de ambos os terminais apresentam fases diferentes,  $R_F \hat{I}_F / \hat{I}_L$  é um número complexo e apresenta uma reatância adicional à falta.

Como se vê na Figura 3.14: i)  $\hat{I}_F$  adiantada em relação  $\hat{I}_L$  provoca aumento na impedância aparente; ii)  $\hat{I}_F$  atrasada em relação  $\hat{I}_L$  provoca redução na impedância

aparente. O próximo método apresenta uma forma de compensar o efeito da reatância.

Figura 3.14 – Erro de reatância no método RS  
(Fonte: adaptado de DAS *et al.* (2014)).



### Método de Takagi

O método proposto por TAKAGI *et al.* (1982), aqui denominado de **Método Takagi**, elimina a influência da corrente de carga, o que é feito subtraindo a corrente de carga da corrente de falta (DAS *et al.*, 2014). A distância da falta, em p.u., calculada por esse método é dada por:

$$d = \frac{\text{Im}\{\hat{V}_L \Delta \hat{I}_L^*\}}{\text{Im}\{Z_{LT1} \hat{I}_L \Delta \hat{I}_L^*\}} \quad (3.29)$$

Sendo  $\hat{V}_L$  e  $\hat{I}_L$  dependentes do tipo de falta e usados de acordo com a Tabela 3.6, e  $\Delta \hat{I}_L^*$  o conjugado complexo da diferença entre corrente de falta e de pré-falta.

Esse método utiliza a corrente  $\Delta \hat{I}_L$  para minimizar o erro da reatância causado pelo carregamento do sistema, porém sua precisão depende do grau de não-homogeneidade do sistema de transmissão. Além disso, o cálculo de  $\Delta \hat{I}_L$  considera que a corrente de carga não é alterada com a incidência da falta, ou seja, a carga é de

corrente constante. Na prática, entretanto, é mais comum a utilização de cargas de potência e impedância constantes.

### Método de Eriksson

Método proposto por ERIKSSON *et al* (1985), aqui denominado de **Método Eriksson**, leva em consideração os efeitos de ambos os terminais da LT. Para superar os erros de reatância causados pela resistência de falta, carregamento ou não-homogeneidade do sistema, ele faz uso dos parâmetros da impedância das fontes dos terminais local e remoto,  $Z_{L1}$  e  $Z_{R1}$ , respectivamente.

O método requer conhecimento da impedância da fonte no terminal remoto. No caso de não se dispor dos dados sobre a impedância da fonte no terminal local, a mesma é determinada utilizando-se:

$$Z_{L1} = -\frac{\hat{V}_{L1} - \hat{V}_{L1\_pre}}{\hat{I}_{L1} - \hat{I}_{L1\_pre}}, \quad (3.30)$$

em que  $\hat{V}_{L1\_pre}$  e  $\hat{I}_{L1\_pre}$  são a tensão e corrente de sequência positiva de pré-falta medidas no terminal local, e  $\hat{V}_{L1}$  e  $\hat{I}_{L1}$  são a tensão e corrente de sequência positiva de falta medidas no terminal local. A distância de falta, em p.u., é encontrada resolvendo:

$$d^2 - K_1 d + K_2 - K_3 R_F = 0, \quad (3.31)$$

com  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$  definidos como:

$$K_1 = 1 + \frac{Z_{L1}}{Z_{LT1}} + \left( \frac{\hat{V}_L}{Z_{L1} \hat{I}_L} \right) = m + jn, \quad (3.32)$$

$$K_2 = \left( 1 + \frac{Z_{L1}}{Z_{LT1}} \right) \left( \frac{\hat{V}_L}{Z_{L1} \hat{I}_L} \right) = o + jp, \quad (3.33)$$

$$K_3 = \left( 1 + \frac{Z_{L1} + Z_{R1}}{Z_{LT1}} \right) \left( \frac{\Delta \hat{I}_L}{Z_{LT1} \hat{I}_L} \right) = q + jr. \quad (3.34)$$

Separando a Equação (3.31) em suas partes real e imaginária, a distância  $d$  é dada conforme a seguinte expressão:

$$d = \frac{\left(m - \frac{qn}{r}\right) \pm \sqrt{\left(m - \frac{qn}{r}\right)^2 - 4\left(o - \frac{qp}{r}\right)}}{2}. \quad (3.35)$$

Existem dois valores possíveis para  $d$ , o que corresponde à distância de falta encontrar-se entre zero e um.

# Capítulo 4 - Materiais e Métodos

Neste capítulo são descritas todas as etapas do processo de modelagem do SEP e do relé, da implementação computacional dos métodos e da conexão do relé SEL-311C com o RTDS®.

## 4.1. Etapa de Modelagem

Antes do advento dos simuladores digitais, o estudo do comportamento transitório dos SEP era feito por simuladores analógicos, que utilizavam modelos elétricos em escala reduzida, conhecidos como *Transient Network Analyzers* (TNA). As perdas elétricas das conexões e os altos custos de aquisição dos TNA aliados ao avanço da tecnologia computacional viabilizou o uso dos simuladores digitais.

Tradicionalmente, as simulações digitais de transitórios eletromagnéticos são realizadas por programas baseados na regra de integração trapezoidal que convertem as equações integrais resultantes de análises nodais do SEP em equações algébricas, como é empregado em programas do tipo EMTP (LEUVEN EMTP CENTER, 1987). A solução dessas equações quando implementada em um computador convencional requer um tempo de processamento de vários segundos, que no jargão técnico é denominada de “simulação em tempo de execução”. Com a tecnologia digital, o tempo de processamento requerido é inferior ao passo de integração, a denominada “simulação em tempo real”, ou seja, o estudo torna-se mais real (LOPES, 2014).

Neste trabalho utilizou-se o RTDS®, considerado o primeiro simulador digital em tempo real de SEP, que foi desenvolvido pelo Centro de Pesquisa HVDC de

Manitoba, no Canadá, na década de 1980, e sua primeira instalação comercial foi feita em 1993 (RTDS, 2016).

A arquitetura do RTDS® é composta de *software* e *hardware*. O *software* possui uma *interface* gráfica denominada de RSCAD, composta por um conjunto de módulos individuais, dentre os quais se destacam neste trabalho:

- *Draft*: módulo no qual o SEP é modelado a partir dos componentes das bibliotecas do SEP, de controle, proteção e automação disponibilizada pelo *software*.
- *TLine*: módulo utilizado para modelagem das LT a partir das características físicas dos condutores e geometria da LT ou dos valores de impedância de sequência positiva e zero.
- *CBuilder*: módulo no qual são criados componentes de controle ou SEP, a partir de código em C, os quais são definidos de acordo com a necessidade do usuário.
- *RunTime*: módulo no qual a simulação é executada e controlada pelo usuário, e onde são observadas as saídas do SEP, como gráficos de corrente e tensão. O arquivo *script*, responsável pela simulação automática dos casos de falta, é criado e executado neste módulo.

O *hardware* é composto por um DSP e um computador com *Reduced Instruction Set Computer* (RISC), baseado na atuação de diversos processadores em paralelo. Uma de suas características mais relevantes é a *interface* de entrada e saída de dados que torna possível a conexão do SEP com equipamentos reais, tais como relés de proteção, equipamentos de monitoramento e sistemas de controle.

### **4.1.1. Modelagem do Sistema Elétrico**

O SEP adotado como sistema-teste neste trabalho, cujo diagrama unifilar é apresentado na Figura 4.1, consiste numa adaptação do SEP de 230 kV proposto pelo IEEE para estudos de proteção (IEEE, 2004).

Ele é composto por:

- Duas LT paralelas, cada uma com 150 km de comprimento (Linha 1 e Linha 2);
- Uma LT de circuito simples de mesmo comprimento (Linha 3);
- Dois equivalentes de Thévenin conectados às barras 1 e 3 ( $V_{s1}$  e  $V_{s2}$ );
- Sistema de proteção composto por um disjuntor, que abre seus contatos comandado pelo sinal de *trip* enviado pelo relé modelado no RTDS®;
- TC e TPC instalados na Barra 2 garantem a redução dos sinais de corrente e tensão e têm relação de transformação de 500:1 e 2000:1, respectivamente.

Os parâmetros utilizados para modelagem das LT e dos equivalentes de Thévenin são apresentados nas Tabela 4.1 e 4.2, respectivamente.

Figura 4.1 - Diagrama unifilar do sistema-teste (Fonte: autoria própria).

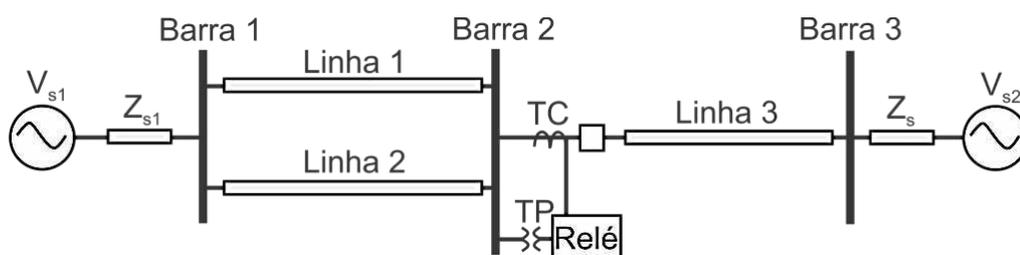


Tabela 4.1 - Parâmetros das LT modeladas (IEEE, 2004).

Sequência	Resistência ( $\Omega/\text{km}$ )	Reatância ( $\Omega/\text{km}$ )	Susceptância ( $\mu\text{S}/\text{km}$ )
Zero	0,246349	1,33113	1,80723
Positiva	0,0937011	0,677849	2,42979

Tabela 4.2 - Parâmetros dos equivalentes utilizados (IEEE, 2004).

Dados	Equivalente	
	S1	S2
Tensão (p.u.)	1,00	0,95
Impedância seq. zero ( $\Omega$ )	$6,1 + j16,7$	$4,1 + j14,7$
Impedância seq. pos. ( $\Omega$ )	$2,7 + j8,4$	$1,7 + j6,4$

Uma descrição sucinta da inclusão de cada componente no SEP é apresentada a seguir.

**Linha de transmissão**

A modelagem de LT é feita no módulo TLine, a parâmetros distribuídos. Quando o tempo de viagem da LT é menor que o passo de simulação, a mesma é representada pelo modelo  $\pi$ . O procedimento consiste em inserir as informações da Tabela 4.1 nos campos de dados tipo RLC disponível no módulo Tline (Figura 4.2) e logo em seguida, selecionar a opção *Compile*. Um arquivo tipo .tlb é então, criado. Como as três LT do sistema-teste apresentam os mesmos dados RLC, essa etapa não precisa ser repetida.

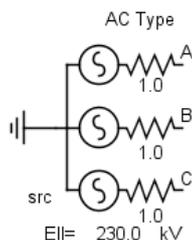
Figura 4.3 – Inserção dos dados da LT - módulo T-Line (Fonte: RSCAD, 2016).

Section	Parameter	Value	Unit
Data Entry Format	Data Entry Format	ohms	
	MVA Base:	100.0	
	Rated Voltage:	230.0	kV
RLC Data	Is the shunt capacitance known?	<input type="checkbox"/>	
	Number of Phases:	3	
	Positive Sequence Series Resistance:	0.0937011	ohms/km
	Positive Sequence Series Ind. Reactance:	0.677849	ohms/km
	Positive Sequence Shunt Cap. Reactance:	0.4116	Megaohms*km
	Zero Sequence Series Resistance:	0.246349	ohms/km
	Zero Sequence Series Ind. Reactance:	1.33113	ohms/km
	Zero Sequence Shunt Cap. Reactance:	0.5533	Megaohms*km
Line Length:	150.0	km	
Mutual Coupling Data	Transposition:	Ideally Transposed	
	Mutual Resistance:	0.162	ohms/km
	Mutual Reactance:	0.781	ohms/km

**Circuitos equivalentes Thévenin**

Para a modelagem dos circuitos equivalentes de Thévenin dispostos em cada terminal, utilizou-se o modelo de fonte AC disponível na biblioteca do módulo Draft, apresentado na Figura 4.3, cuja configuração foi feita com os dados da Tabela 4.2.

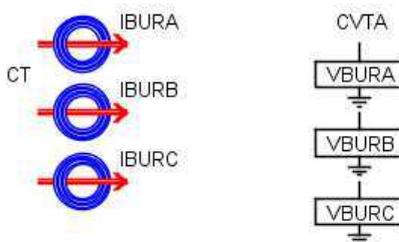
Figura 4.2 - Modelo de fonte AC - módulo Draft (Fonte: RSCAD, 2016).



### Transformadores para Instrumentos

A modelagem dos TC e TPC foi feita usando o modelo disponível na biblioteca do módulo Draft (Figura 4.4).

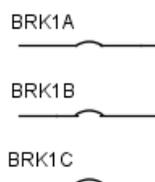
Figura 4.3 - Modelo de TC e TPC - módulo Draft (Fonte: RSCAD, 2016).



### Disjuntor

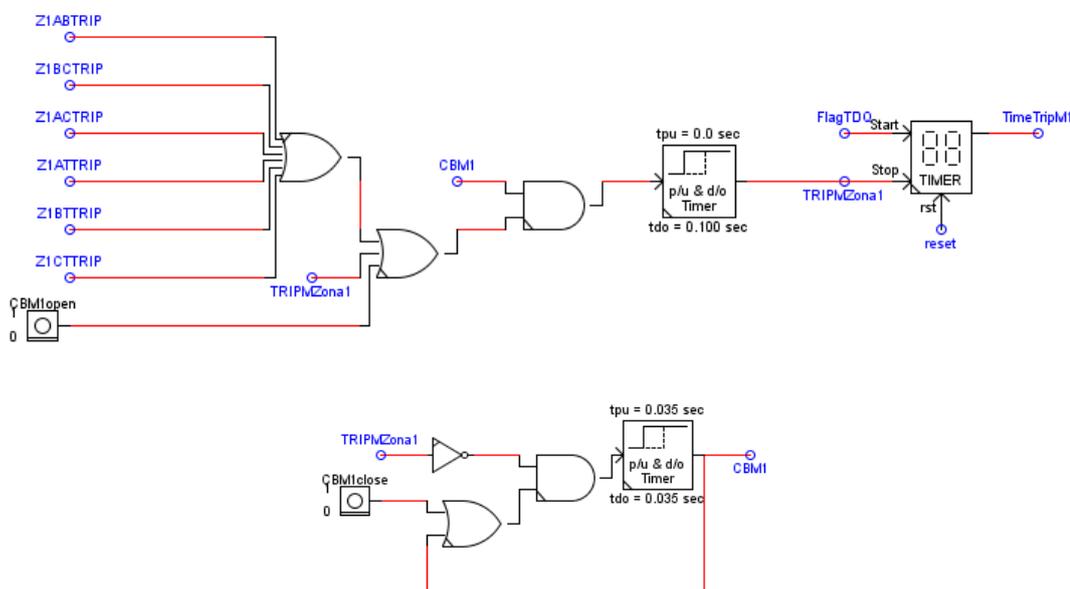
A modelo de disjuntor disponível no módulo Draft possui a opção de monitoramento de sua corrente e, para a sua abertura, o usuário pode optar por operação monopolar ou tripolar. O modelo utilizado neste trabalho foi de abertura tripolar, ou seja, os contatos de cada fase são abertos simultaneamente (Figura 4.5).

Figura 4.4 - Modelo de disjuntor - módulo Draft (Fonte: RSCAD, 2016).



Um dos circuitos que comandam a abertura do disjuntor é apresentado na Figura 4.6, nos quais existem botões que permitem a abertura e fechamento manuais dos contatos dos disjuntores.

Figura 4.5 – Lógica para abertura de disjuntor para *trip* de 1ª zona da característica mho (Fonte: autoria própria).

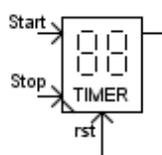


O sinal de *trip* dos elementos de fase-terra e fase-fase das características de operação são entradas de uma porta lógica OU, cuja saída é a entrada de outra porta lógica OU, juntamente com o sinal de *trip* geral e o botão de abertura.

O *trip* geral muda de estado (0 para 1) instantaneamente, para faltas em 1ª zona quando o disjuntor está fechado e algum elemento de fase-fase ou fase-terra gera um *trip*, fazendo o disjuntor abrir.

Em caso de falta em 2ª zona, a lógica se apresenta de forma semelhante, porém, há um atraso de 200 ms para que o *trip* geral mude de estado. Para simular o atraso na abertura dos contatos do disjuntor, acrescenta-se um atraso de 35 ms após o *trip* geral. A medição do intervalo de tempo entre a detecção da falta e a mudança de estado do *trip* geral é realizada pelo bloco Cronômetro disponível na biblioteca de componentes de controle do módulo Draft, apresentado na Figura 4.7.

Figura 4.6 – Bloco cronômetro utilizado para medição do tempo de *trip* (Fonte: RSCAD, 2016).



## 4.1.2. Processamento dos Sinais de Tensão e Corrente

### Filtro *anti-aliasing*

Devido ao fato dos sinais de tensão e corrente provenientes de faltas apresentarem componentes de alta frequência superpostas à frequência fundamental, é necessária a realização de um processo de filtragem, para evitar a sobreposição de espectro (ou *aliasing*) no processo de digitalização (PHADKE & THORP, 2009). Isso foi feito com filtros passa-baixas (denominados filtros *anti-aliasing*) de frequência de corte<sup>3</sup> de 180 Hz, do tipo Butterworth de 2ª ordem, disponível na biblioteca de componentes de controle do *Draft*. O resultado do processo de filtragem é ilustrado na Figura 4.8.

### Decimação e Filtragem

Devido ao fato dos registros oscilográficos simulados terem sido gerados com taxa de amostragem muito alta (196 amostras/ciclo), foi necessária a realização da redução dessa taxa antes do processamento desses sinais pelos algoritmos do relé. O processo de redução da taxa de amostragem, sem a necessidade de converter a sequência de tempo discreto para tempo contínuo e depois refazer a amostragem, é denominada “decimação” (MACHADO, 2013). Esse processo foi executado em três etapas e utilizou os elementos disponíveis na biblioteca de componentes de controle do módulo *Draft*.

- 1ª decimação: aplicada aos sinais oriundos dos filtros *anti-aliasing*, os quais foram amostrados a uma taxa de 96 amostras/ciclo (5760 Hz).
- Filtragem: após a 1ª decimação, os sinais foram aplicados a um filtro de média móvel, que teve como propósito reduzir o ruído branco e fornecer resposta ao degrau acentuada (RTDS TECHNOLOGIES, 2015).
- 2ª decimação: a última etapa consistiu em reduzir a taxa de amostragem dos sinais provenientes do filtro de média móvel para 16 amostras/ciclo (960 Hz),

---

<sup>3</sup>Segundo o teorema de Nyquist, a frequência de corte deve ser menor que a metade da frequência de amostragem considerada no processo de conversão A/D dos sinais.

tornando-a compatível com a amostragem utilizada pelos relés digitais (ANDERSON, 1999).

O resultado dessa etapa pode ser visto na Figura 4.9, que apresenta os sinais de tensão e corrente após aplicação de uma falta do tipo ABT.

Figura 4.7 – Sinais de corrente: (a) provenientes do TC e (b) filtrados pelo filtro Butterworth (Fonte: autoria própria).

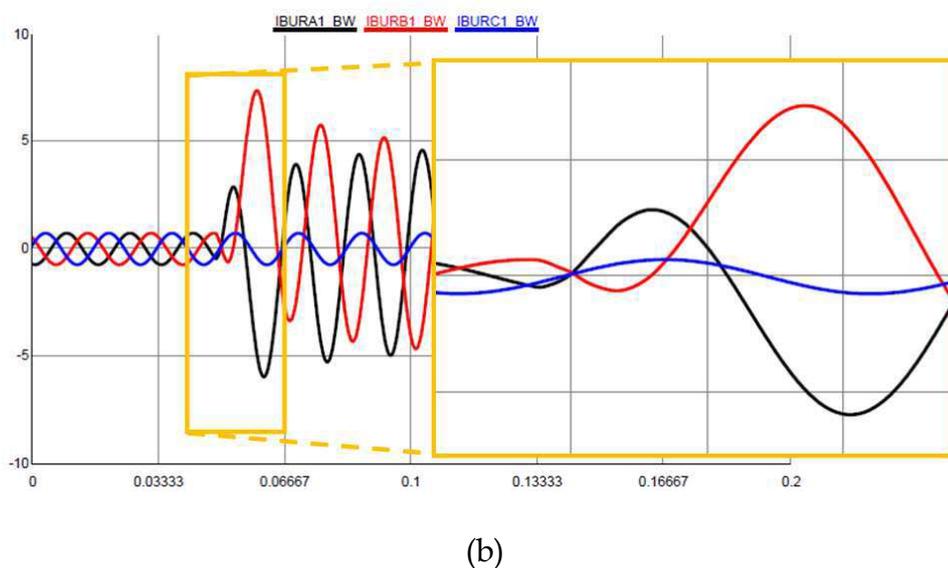
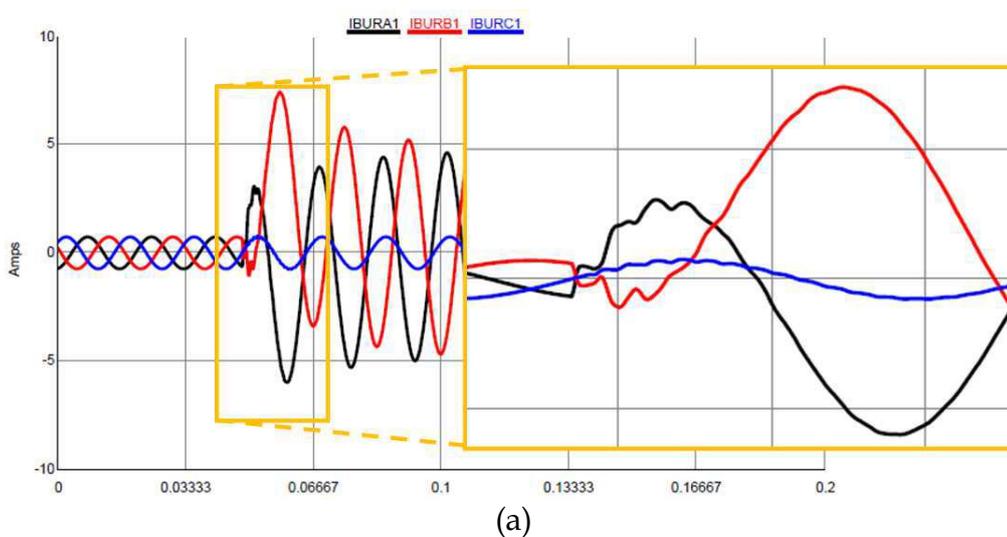
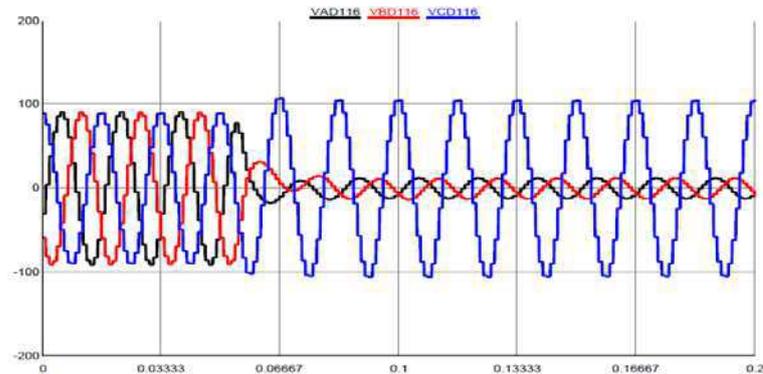


Figura 4.8 - Sinal de tensão amostrado a 16 amostras por ciclo (Fonte: autoria própria).



### Remoção da Componente CC de Decaimento Exponencial

O próximo passo consistiu em remover a componente CC de decaimento exponencial. Conforme apresentado em SILVA (2009), as formas de onda dos sinais de tensão e corrente, nos primeiros instantes após o início da falta, deixam de ser puramente senoidais, ocasionando oscilações nos módulos dos fasores estimados. Isso ocorre por causa da aparição de uma componente CC de decaimento exponencial, que deve ser removida para o cálculo da impedância aparente. Neste trabalho, a remoção foi feita por meio do uso de um filtro do tipo passa-alta disponível no módulo *Draft*, apresentado na Figura 4.10.

O algoritmo do filtro proporciona a rejeição de qualquer decaimento de onda nos sinais provenientes do TC e do TPC (RTDS TECHNOLOGIES, 2015). Os dados de entrada são os sinais trifásicos, o sinal de *trigger* gerado pelo amostrador e o sinal de um *switch*, que vai habilitar ou não a filtragem. Na Figura 4.11 apresenta-se uma comparação dos sinais de corrente com e sem a remoção da componente CC. Ao remover a componente CC, observa-se que a corrente atinge o valor de regime permanente de forma mais rápida. O efeito da remoção da componente CC de decaimento exponencial na resposta da estimação fasorial da corrente de fase A para uma falta AT é apresentado na Figura 4.12, na qual se observa que, sem a componente CC, o módulo do fasor apresenta uma oscilação mais atenuada.

Figura 4.9 – Bloco do filtro para remoção da componente CC de decaimento exponencial (Fonte: RSCAD, 2016).

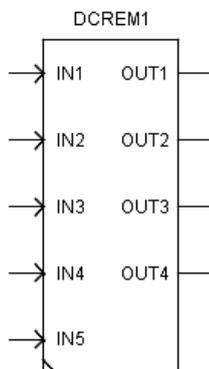
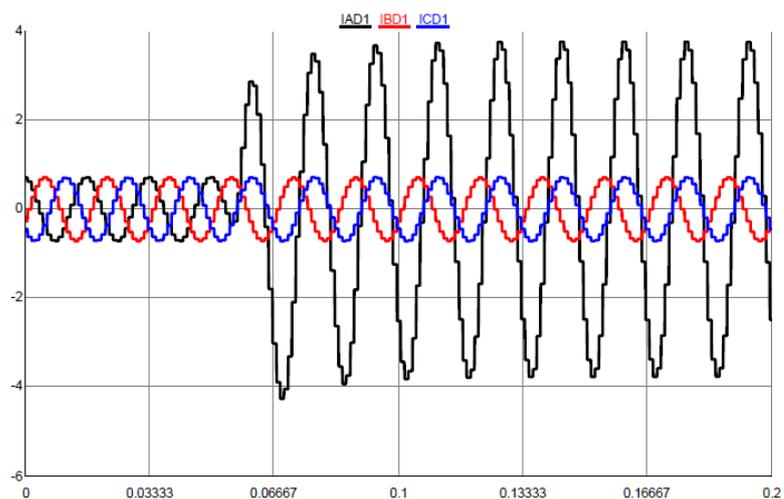
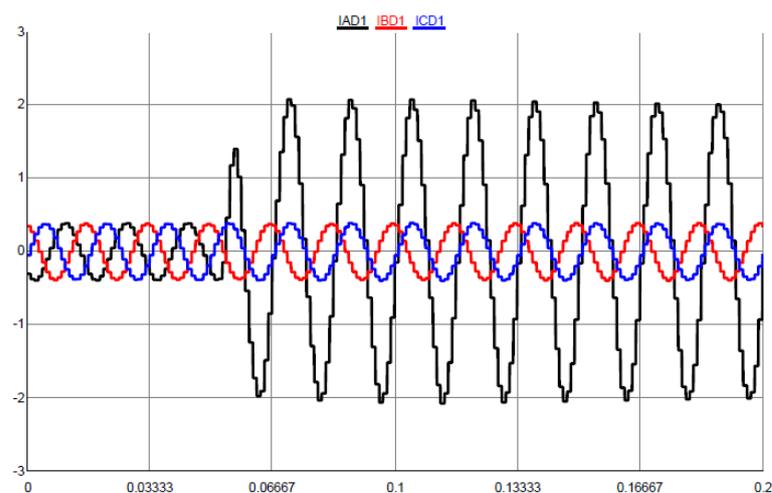


Figura 4.10 – Comparação do sinal de corrente: (a) sem remoção da componente CC; (b) com remoção da componente CC (Fonte: autoria própria).

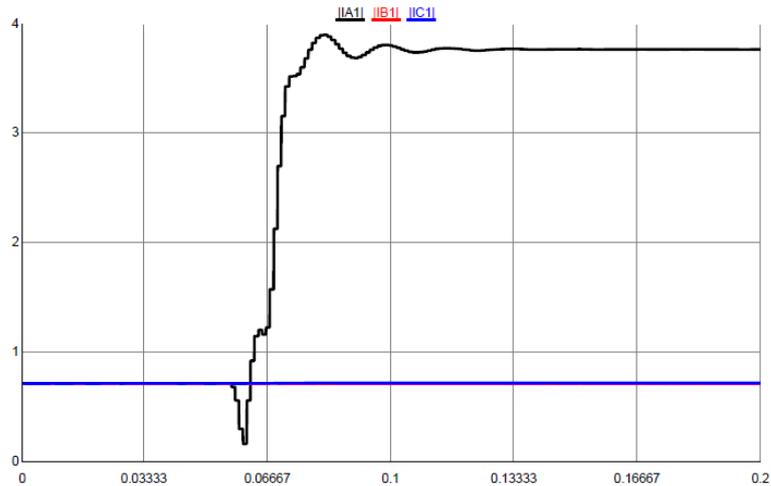


(a)

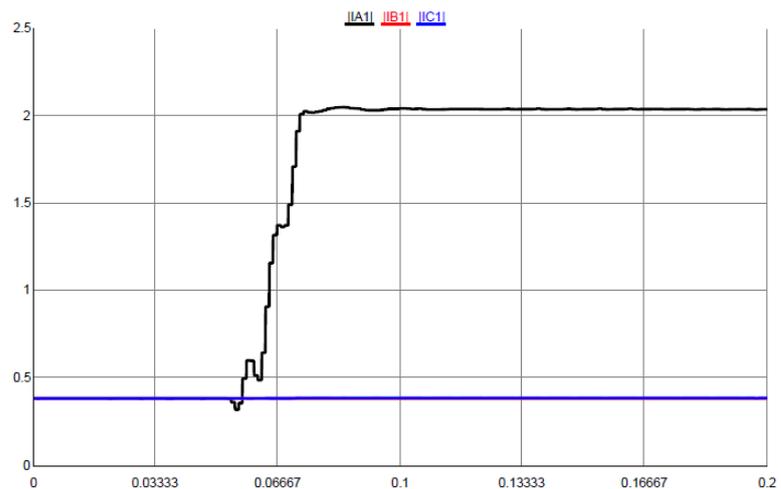


(b)

Figura 4.11 – Efeito na estimação fasorial: (a) sem remoção da componente CC; (b) com remoção da componente CC (Fonte: autoria própria).



(a)



(b)

**Estimação Fasorial**

A etapa de estimação dos fasores é uma das mais importantes do modelo de um relé de distância, visto que a partir dela são calculados os fasores de tensão e corrente utilizados como entradas das demais etapas. Análise do estado da arte mostrou que a transformada discreta de Fourier é um dos algoritmos mais utilizados para estimar os fasores da componente de frequência fundamental em relés digitais de proteção (MACHADO *et al.*, 2011).

Dentre as diferentes formas de janelamento, o filtro de Fourier de ciclo completo, também denominado de transformada discreta de Fourier de ciclo completo (TDFCC), foi o escolhido para a realização desta etapa de acordo com os resultados apresentados em LOPES *et al.* (2015). Esse filtro consiste em extrair a componente de frequência fundamental de um sinal  $x(t)$  a partir do produto de um ciclo de amostras deste sinal com as funções seno e cosseno (SILVA, 2009). Para uma janela com  $N$  amostras por ciclo,  $(N/2 - 1)$  harmônicas podem ser extraídas (MACHADO *et al.*, 2011).

Matematicamente, as componentes fasoriais podem ser calculas por:

$$Y_s = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \text{sen} \left( k \frac{2\pi}{N} \right) \quad (4.1)$$

$$Y_c = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_k \text{cos} \left( k \frac{2\pi}{N} \right). \quad (4.2)$$

Sendo a amplitude e a fase do fasor na frequência fundamental calculadas como segue:

$$A_1 = \sqrt{Y_{s1}^2 + Y_{c1}^2} \quad (4.3)$$

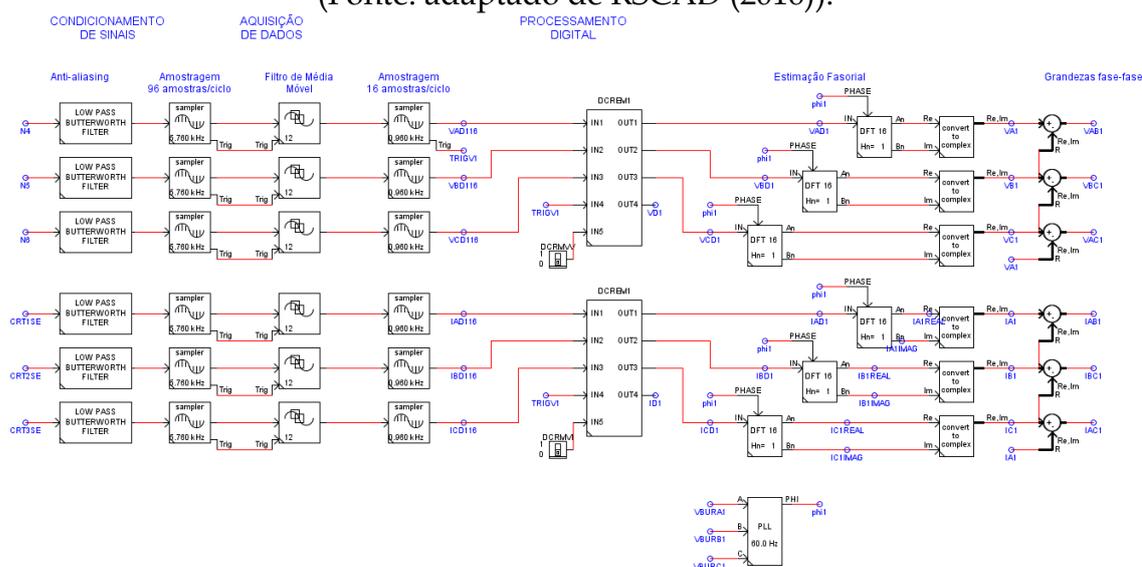
$$\varphi_1 = \tan^{-1} \left( \frac{Y_{s1}}{Y_{c1}} \right). \quad (4.4)$$

O bloco disponibilizado na biblioteca de componentes de controle do módulo `Draft` realiza a transformada de Fourier e tem como um dos parâmetros, o número de amostras por ciclo, que neste trabalho foi definido como 16. Esse bloco é utilizado em conjunto com o *Phase Locked Loop*, que fornece a fase do sinal de entrada e mantém o algoritmo de proteção em sincronia com a frequência do SEP (RTDS TECHNOLOGIES, 2015).

Com isso, parte da arquitetura do relé modelado está concluída conforme mostrado na Figura 4.13. A unidade de condicionamento de sinais é composta pelo filtro *anti-aliasing*; a unidade de aquisição de dados é composta pelos amostradores, que

realizam o processo de decimação, substituindo a conversão A/D. Neste estudo, o circuito multiplexador e *sample and hold* não foram necessários, pois o valor da amostra se mantém fixo durante o intervalo de tempo de amostragem, como apresentado na Figura 4.9. Finalmente, parte do processamento é realizada com a estimação dos fasores.

Figura 4.12 - Implementação do processamento dos sinais de tensão e corrente (Fonte: adaptado de RSCAD (2016)).



### 4.1.3. Implementação dos Métodos

No total, o trabalho consiste na implementação de nove algoritmos, correspondentes aos nove métodos estudados.

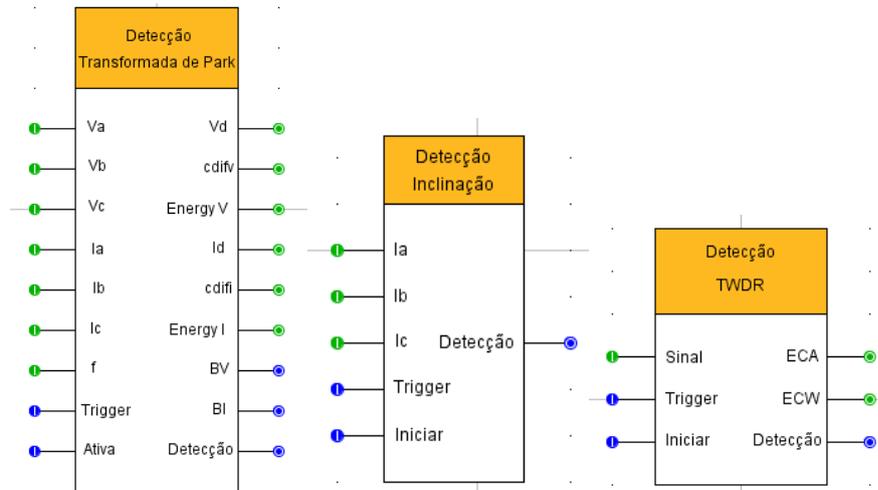
#### Deteção da Falta

Os algoritmos dessa etapa foram implementados em blocos criados no módulo CBuilder (Figura 4.14), cujas entradas foram: i) os sinais amostrados de corrente e/ou tensão; ii) o sinal de *trigger* proveniente do bloco amostrador (16 amostras/ciclo) para garantir o sincronismo entre a amostragem e o processamento dos algoritmos; iii) a frequência do SEP (no caso do método TDQ); iv) o sinal INICIAR proveniente de um botão, cuja função é inicializar as variáveis contidas no

código do bloco. Esse botão deve ser pressionado no módulo `RunTime` uma vez antes da aplicação da falta.

Cada bloco possui saídas particulares, conforme requerido pelo algoritmo, entretanto, todos apresentam como saída o `flag` que muda de estado (0 para 1) quando uma falta é detectada.

Figura 4.13 – Blocos da etapa de detecção da falta (Fonte: autoria própria).



Para observar o tempo de detecção a partir do instante de incidência da falta, utilizou-se o bloco `Cronômetro` (Figura 4.7). Para indicar a incidência da falta, utilizou-se o sinal de início da contagem do tempo em segundos (`Start`). A contagem cessa quando o `flag` de detecção muda de estado (0 para 1) na entrada `Stop` do bloco. O sinal de `reset` é proveniente do botão `ResetTimer`, que deve ser pressionado no módulo `RunTime` antes da aplicação da falta. A avaliação dos métodos baseou-se no tempo de detecção medido.

### Classificação da Falta

A etapa de classificação da falta requereu, também a construção de blocos no módulo `Cbuilder` conforme mostrado na Figura 4.15. O bloco do método `TDQ` tem como entrada os sinais de corrente; o método `TW` utiliza as energias calculadas pelo bloco de detecção e o bloco de `Sobrecorrente`, tem como entradas os fasores de corrente. Todos os blocos apresentam uma entrada referente ao botão `INICIAR` para iniciar as variáveis no código e outra entrada referente ao atraso do processamento dos

algoritmos, visando considerar as informações referentes ao SEP em 2,5 ciclos após a detecção da falta. Com isso, a etapa de classificação não é afetada pelos transitórios iniciais da falta. Como saída, cada bloco apresenta o tipo de falta em forma de número inteiro variando de 0 a 10, sendo o número 10 correspondente à não classificação, além de informações particulares de cada algoritmo para efeito de observação.

Para visualização, no módulo RunTime, das fases envolvidas na falta, criou-se um bloco no módulo CBuilder (Figura 4.16) que tem como entrada a classificação da falta. As saídas mudam de nível (0 para 1) conforme a classificação. No módulo RunTime, essas saídas são visualizadas por meio de indicadores luminosos, que acendem caso o sinal seja 1 e permanecem apagados, caso seja 0.

Figura 4.14 - Blocos da etapa de classificação da falta (Fonte: autoria própria).

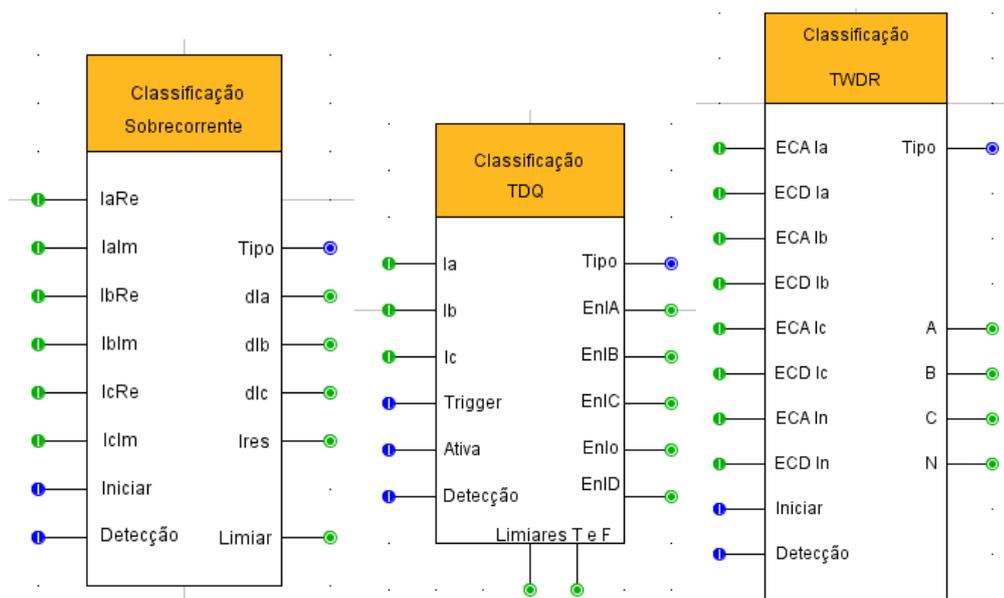
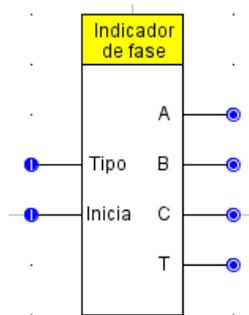


Figura 4.15 - Bloco que indica as fases envolvidas na falta (Fonte: autoria própria).



### Localização da Falta

A etapa de localização da falta foi, em sua maioria, implementada utilizando blocos disponíveis na biblioteca de componentes de controle do módulo *Draft*, visto que requer a realização de operações matemáticas com números complexos. Foi necessária ainda, a construção no módulo *Cbuilder* de novos componentes para o processamento das informações.

Conforme mostrado na Figura 4.17, todos os blocos têm como entrada o tipo da falta determinado na etapa anterior. Além disso, houve a necessidade de criação de um novo componente para salvar as informações do regime permanente pré-falta (Figura 4.18), as quais são necessárias nos métodos de Takagi e Eriksson. Esse componente tem como entradas os sinais observados e o enviado pelo botão INICIAR, que deve ser pressionado no módulo *RunTime* antes da aplicação da falta.

Figura 4.16 - Blocos da etapa de localização da falta (Fonte: autoria própria).

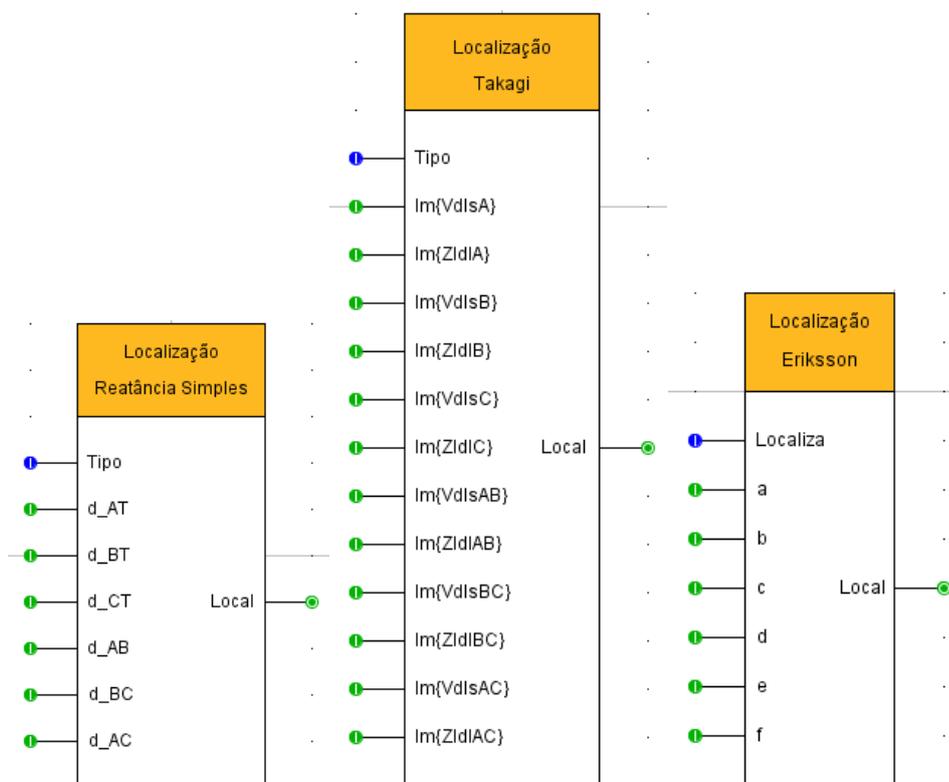
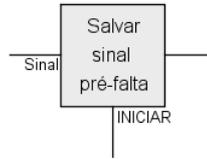


Figura 4.17 – Bloco que salva as informações do sinal antes da aplicação da falta  
(Fonte: autoria própria).



#### 4.1.4. Implementação das Características de Operação

As características mho e quadrilateral foram implementadas utilizando apenas blocos disponíveis na biblioteca de controle do módulo *Draft*, com base nas informações disponibilizadas no Manual do *software* RSCAD (RTDS TECHNOLOGIES, 2015).

O circuito de memória de tensão de sequência positiva é apresentado na Figura 4.19, no qual um filtro passa-faixa, de ganho 0,034 e taxa de amortecimento 0,017, é ajustado na frequência fundamental para sustentar o sinal de tensão caso a entrada caia abruptamente para zero, como ocorre em faltas próximas à barra. O sinal de tensão utilizado como entrada é o sinal de saída do filtro passa-alta removedor da componente CC de decaimento exponencial ( $V_{AD1}$ ,  $V_{BD1}$  e  $V_{CD1}$ ). A grandeza fundamental é obtida por meio do bloco transformada de Fourier, cuja fase de entrada  $\phi_{i1}$  é obtida do bloco *Phase Locked Loop* utilizado na arquitetura do relé. A tensão de sequência positiva  $V_{APOL}$  é obtida aplicando-se a teoria de componentes simétricas, em que  $A$  corresponde ao número complexo de módulo 1 e fase  $120^\circ$ , e  $A^2$  corresponde ao número complexo de módulo 1 e fase  $240^\circ$ , utilizados no teorema de Fortescue.

A configuração do alcance de cada zona da característica mho é apresentada na Figura 4.20. A variável  $Z_{1L}$  corresponde ao módulo da impedância secundária de sequência positiva da LT, enquanto  $Z_{1ANG}$  corresponde à sua fase. A 1ª zona é ajustada para cobrir 80% da LT ( $Z_{ona1}$ ), enquanto a 2ª zona cobre 120% da LT ( $Z_{ona2}$ ).

Figura 4.18 – Circuito de polarização por memória de tensão (Fonte: RSCAD, 2016).

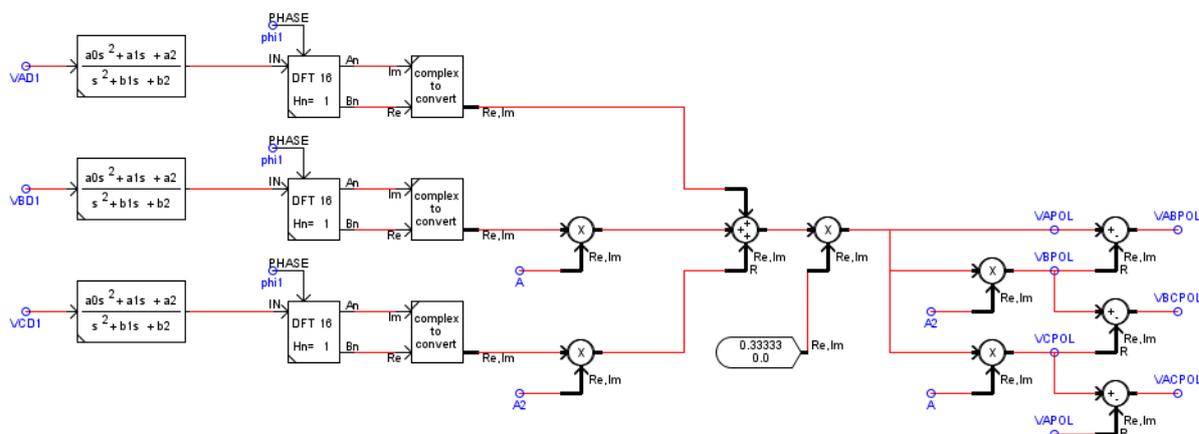
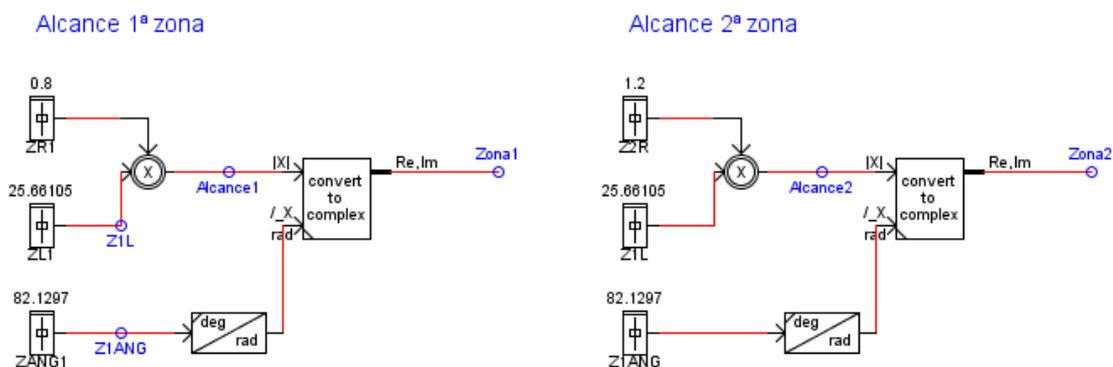
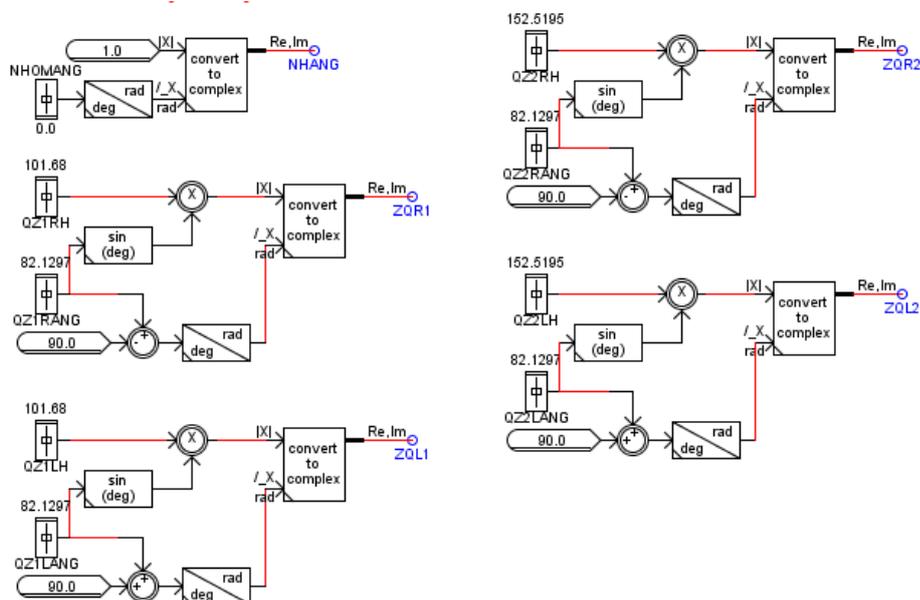


Figura 4.19 – Alcances de 1ª e 2ª zonas da característica mho (Fonte: adaptado de RSCAD (2016)).



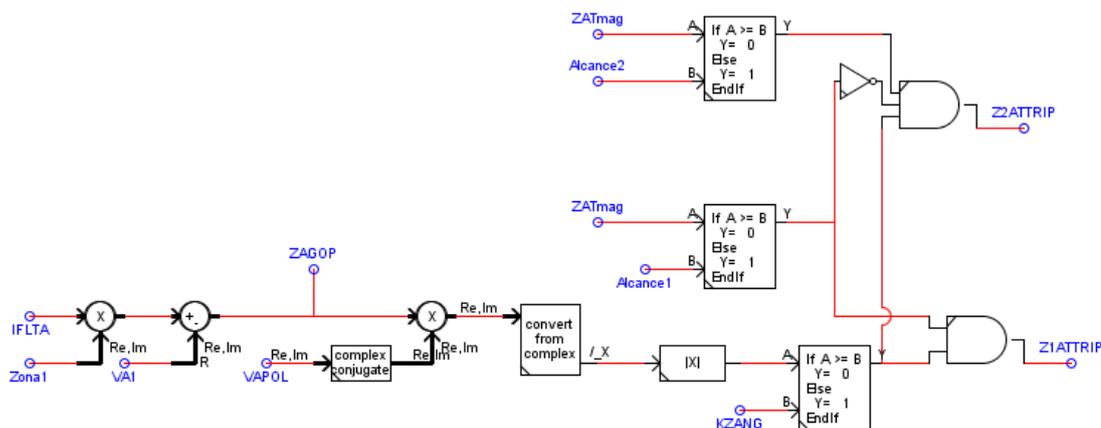
A configuração para os ajustes dos elementos resistivos direito e esquerdo de 1ª e 2ª zonas da característica quadrilateral (ZQR1, ZQL1, ZQR2 e ZQL2) é apresentada na Figura 4.21, juntamente com o ângulo para correção de não homogeneidade NHANG, adotado como sendo 0°. A determinação dos valores foi definida na Memória de Cálculo do relé SEL-311C, conforme descrito anteriormente. Neste trabalho, optou-se por utilizar o mesmo valor para os lados positivo e negativo.

Figura 4.20 – Configuração dos elementos resistivos da característica quadrilateral para as duas zonas de proteção (Fonte: adaptado de RSCAD (2016)).



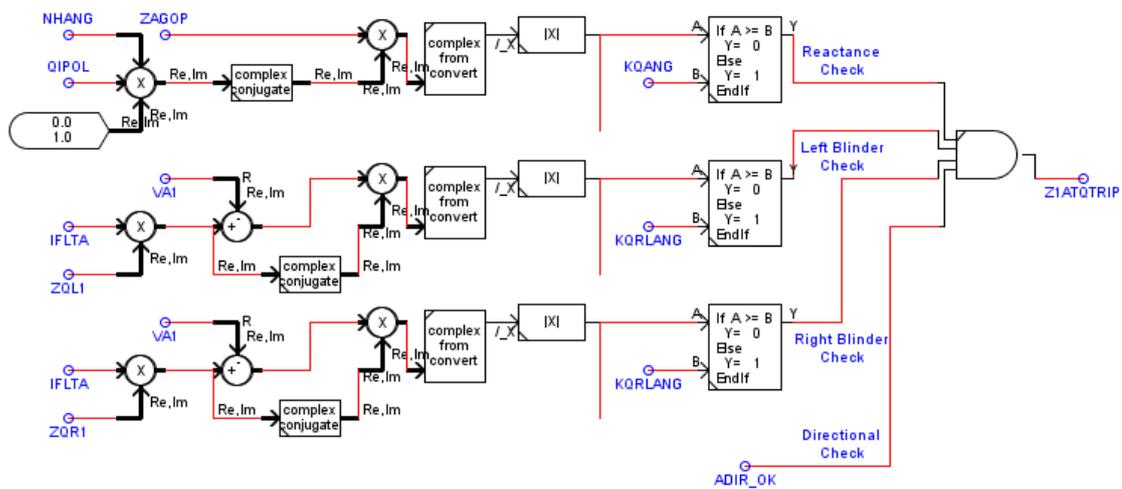
A lógica de *trip* e determinação da zona de atuação da característica mho para elemento fase-terra são apresentadas na Figura 4.22. O cálculo  $\hat{V}_{op} = -\hat{V}_R + Z_A \hat{I}_R$  foi efetuado e seu valor, ZAGOP, foi multiplicado com o conjugado da tensão de polarização para determinar se a diferença entre as fases está dentro do limite de  $90^\circ$ , representado pela variável KZANG. Caso essa condição seja atendida e o módulo da impedância aparente calculada ZATmag esteja dentro do limite de 1ª zona Alcance1, a variável Z1ATTRIP, que corresponde ao *trip* de 1ª zona, recebe valor 1. O mesmo raciocínio se aplica para o *trip* de 2ª zona, Z2ATTRIP.

Figura 4.21 – Comparadores de fase e de alcance para geração do *trip* e determinação da zona de atuação (Fonte: adaptado de RSCAD (2016)).



Para geração do sinal de *trip* em 1ª zona da característica quadrilateral, foram feitas comparações para os elementos de reatância, resistivo direito e esquerdo e direcional, conforme apresentado na Figura 4.23. Caso todos estejam dentro de seus respectivos limites de 90° (KQANG e KQRLANG), a variável Z1ATQTRIP recebe valor 1 e o *trip* é gerado.

Figura 4.22 - Comparadores para característica quadrilateral (Fonte: adaptado de RSCAD (2016)).



### 4.1.5. Etapa de Simulação

O termo “simulação em massa” descreve a habilidade de um arquivo script executar diferentes casos, sem que o usuário interaja com o simulador. Esse tipo de operação é muito útil para testes de relés, pois permite a simulação de diversos casos de falta (RTDS TECHNOLOGIES, 2015), economizando e otimizando o tempo envolvido no estudo (SANTO *et al.*, 2001).

A simulação em massa é uma funcionalidade do módulo RunTime. A criação do arquivo script é feita via função record/playback. A função record grava as ações que são realizadas manualmente pelo usuário no módulo RunTime, como, por exemplo, pressionar o botão para aplicação de falta. A função playback executa as ações que foram gravadas (SANTO *et al.*, 2001). Para que esse recurso seja explorado adequadamente, é preciso que o circuito seja modelado de modo que permita mudança de suas variáveis automaticamente.

O modelo de falta utilizado na avaliação dos métodos utiliza `switches` para a escolha das fases envolvidas na falta e `sliders` para a variação dos valores de local, ângulo de incidência e resistência de falta. Os valores escolhidos para esses parâmetros são apresentados na Tabela 4.3. Ao total, 600 casos diferentes de faltas foram gerados pelo arquivo `script`.

Tabela 4.4 - Parâmetros das faltas simuladas.

Parâmetros	Valores escolhidos
Tipo de falta	AT, BT, CT, AB, BC, AC, ABT, BCT, ACT, ABC
Local de falta (km)	15, 45, 75, 105, 135
Ângulo de incidência $\theta_F$ (°)	0, 30, 60, 90
Resistência de falta $R_F$ ( $\Omega$ )	0,001, 5, 50

Ao executar o arquivo `script`, o RTDS® simula os casos na sequência programada, aplicando as faltas no SEP modelado e gerando um arquivo com os dados obtidos. A cada falta aplicada, os gráficos de tensão e corrente são atualizados, assim como as saídas dos algoritmos, permitindo que o usuário observe a simulação em tempo real (SANTO *et al.*, 2001).

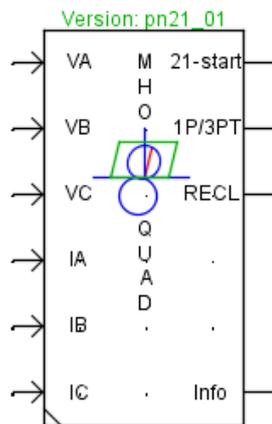
## 4.2. Relé de Distância do RTDS®

Para validar o relé implementado neste trabalho, tomou-se como referência o relé de distância disponível na biblioteca de componentes de proteção e automação do módulo `Draft` do próprio RTDS®, aqui denominado de `RELÉ_RTDS`. Esse relé possui *trip* mono ou tripolar e esquema de religamento e permite comunicação de esquemas de *trip* e proteção para falha de disjuntor. Porém, essas e outras funcionalidades não foram exploradas, para que o `RELÉ_RTDS` se assemelhasse ao relé modelado.

A medição de impedância possui três unidades para faltas fase-terra e três para faltas fase-fase. As características de operação são a *mho* e quadrilateral. A taxa de amostragem utilizada é de 8 amostras/ciclo. Como entrada, o `RELÉ_RTDS` recebe os

sinais de tensão e corrente do SEP, conforme mostrado na Figura 4.24. Como saída, são observados os sinais de *trip* para cada fase e os sinais de entrada nas 1ª e 2ª zonas. Além disso, é possível monitorar no módulo RunTime as impedâncias fase-terra e fase-fase calculadas pelo relé.

Figura 4.23 – Relé de distância disponível no RTDS®  
(Fonte: RSCAD, 2016).



O RELÉ\_RTDS apresenta filtro *anti-aliasing*, subamostrador, estimação fasorial pela transformada de Fourier e utiliza memória de tensão de sequência positiva quando não há alcance reverso. Para as faltas fase-terra, utiliza o fator de compensação  $K$ , que pode ser informado pelo usuário ou calculado automaticamente (RTDS TECHNOLOGIES, 2015).

A comparação do relé modelado com o RELÉ\_RTDS foi feita através da observação do instante de *trip*. Não foi possível comparar o desempenho do relé modelado em termos de tempo de detecção, classificação e localização, visto que o RELÉ\_RTDS não disponibiliza tais informações, o que reforça a necessidade da modelagem de um relé de distância que seja capaz de fornecer o diagnóstico da falta.

### 4.3. Relé SEL-311C

Uma segunda avaliação do desempenho do relé modelado foi realizada com o relé digital SEL-311C (Figura 4.25), produzido pela *Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

(SEL), uma empresa multinacional que comercializa produtos e serviços para automação, proteção e controle dos SEP.

De acordo com o fabricante (SEL, 2006), esse é um relé de proteção multifunção para LT, com disparo e religamento mono ou tripolar, tipo SEL-311C. Possui um conjunto eficaz de elementos de proteção de fase e terra, associados à função de bloqueio por oscilação de potência e a um religador com quatro tentativas de religamento, propiciando ao usuário diversos esquemas de abertura através da proteção de distância com zonas temporizadas e baseados nos sistemas de comunicação.

Figura 4.24 – Relé SEL-311C (Fonte: SEL, 2006).

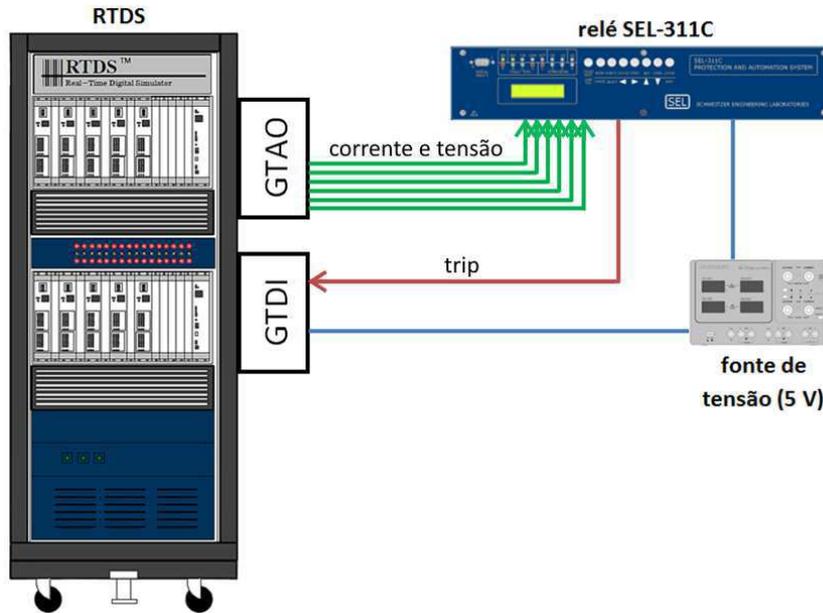


Os ajustes do relé (parametrização) foram feitos por meio do *software* AcSELerator Quickset® SEL-5030, o qual permite ao usuário criar e alterar ajustes, desenvolver lógicas gráficas, projetar *templates*, coletar dados, acessar outras ferramentas que facilitam o gerenciamento e comissionamento dos *Intelligent Electronic Devices* (IED), como por exemplo: análise de eventos, visualização das medições fornecidas pelo relé e coleta dos registros oscilográficos gerados pelo equipamento (SEL-311C).

O relé contém quatro zonas de elementos de distância tipo mho e quadrilateral, porém, apenas duas zonas foram utilizadas, visando deixá-lo semelhante ao relé modelado. Os elementos da mho utilizam memória com polarização por sequência positiva, enquanto o elemento direcional é por sequência negativa.

A comparação entre as atuações do relé SEL-311C e do relé modelado foi feita observando-se: tempo do sinal de *trip*, zona de atuação, tipo e local da falta. Para isso, o RTDS® foi conectado ao relé SEL-311C em malha fechada, como mostrado no esquema da Figura 4.26.

Figura 4.25 – Esquema de conexão entre o relé SEL-311C e o RTDS® (Fonte: autoria própria).



O cartão *Gigabit Transceiver Analogue Output* (GTAO) é o elemento responsável por externar os sinais do RTDS®. Ele contém doze canais de saída analógica de 16 bits, fornecendo sinais com valores de pico de  $-10$  a  $+10$  V. Para recepção do sinal digital, utiliza-se o cartão *Gigabit Transceiver Digital Input* (GTDI) que possui 64 canais de entrada digital (RTDS TECHNOLOGIES, 2015). Ambos os cartões devem ser incluídos e devidamente configurados na modelagem do SEP no módulo *Draft* do RSCAD.

Seis canais do cartão GTAO são conectados ao relé para envio dos sinais de corrente na Linha 3 e tensão na Barra 2. Uma das saídas do relé é conectada a um canal do cartão GTDI para envio do sinal de *trip*.

Devido aos contatos envolvidos serem do tipo seco, foi necessário o uso de uma fonte de tensão DC auxiliar em 5 V para alimentar o circuito (COUTINHO, 2012).

# Capítulo 5 - Apresentação e Análise dos Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados e análises dos métodos estudados e implementados. Ao final do processo de análise, o método de cada etapa que apresentou o melhor desempenho foi implementado no relé. Em seguida, novas simulações foram realizadas com o objetivo de comparar o desempenho do relé modelado com o RELÉ\_RTDS e com o relé SEL-311C.

## 5.1. Seleção do Método de Detecção da Falta

A seleção do método de detecção mais adequado baseou-se na análise das seguintes questões:

- O método conseguiu detectar a falta?
- Em que instante a falta foi detectada?

Com base nessas questões, dois parâmetros foram avaliados:

- Taxa de acerto:

$$TA = \frac{\text{número de faltas detectadas}}{\text{número de faltas simuladas}} \times 100\%, \quad (5.1)$$

- Tempo médio de detecção:

$$t_M = \frac{\text{soma de todos os tempos obtidos}}{\text{número de detecções}} \times 100\%. \quad (5.2)$$

O levantamento do desempenho dos métodos em relação às 600 faltas simuladas resultou na Tabela 5.1, da qual conclui-se que: i) o método TDQ apresentou a maior taxa de amostragem; ii) o método TW foi o mais rápido.

Tabela 5.1 - Desempenho dos métodos de detecção da falta.

Método	TA	$t_M$
TDQ	99,67 %	4,53 ms
TW	99,00 %	4,42 ms
INC	98,67 %	5,80 ms

Averiguação do desempenho dos métodos em relação a diversos parâmetros foi realizada, conforme apresentado a seguir

**Tipo de falta:** os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.2, da qual conclui-se que:

- i. O método TDQ apresentou a maior taxa de acerto e foi o mais rápido nos casos de faltas envolvendo mais de uma fase;
- ii. O método TW foi o mais rápido na maioria dos casos;
- iii. De modo geral, todos os métodos apresentaram os piores resultados na detecção das faltas monofásicas com resistência elevada ( $R_F = 50 \Omega$ ) e localizadas a 105 e 135 km da Barra 2.

**Local de ocorrência da falta:** para investigar a influência desse parâmetro, faltas do tipo AT, com  $R_F$  de  $0,001 \Omega$  e ângulo de incidência de  $90^\circ$  foram simuladas. No estudo, o local de aplicação da falta variou considerando um passo de 7,5 km, iniciando no quilômetro 15 da Barra 2 da Linha 3, até o quilômetro 135. Os resultados dos tempos de detecção obtidos são apresentados na Tabela 5.3, da qual conclui-se que:

- i. O método INC foi o menos afetado pela distância;
- ii. O método TW apresentou um atraso na detecção das faltas localizadas a partir de 45 km da LT.

Tabela 5.2 – Métodos de detecção *versus* tipo de falta.

Tipo de Falta	TA			$t_M$		
	TDQ	TW	INC	TDQ	TW	INC
AT	100%	100%	95%	5,5 ms	4,5 ms	6,4 ms
BT	98,33%	98,33%	98,33%	5,2 ms	4,8 ms	5,7 ms
CT	100%	93,33%	93,33%	5,3 ms	6,2 ms	6,1 ms
AB	100%	100%	100%	3,8 ms	3,8 ms	5,7 ms
BC	100%	98,33%	100%	4,3 ms	4,6 ms	5,8 ms
AC	98,33%	100%	100%	4,8 ms	4,4 ms	6,1 ms
ABT	100%	100%	100%	3,7 ms	3,8 ms	5,6 ms
BCT	100%	100%	100%	4,4 ms	4,2 ms	5,6 ms
ACT	100%	100%	100%	4,5 ms	4,1 ms	5,7 ms
ABC	100%	100%	100%	3,8 ms	3,8 ms	5,3 ms

Tabela 5.3 – Métodos de detecção *versus* local de ocorrência da falta.

Local da Falta (km)	$t_M$		
	TDQ	TW	INC
15,0	4,3 ms	3,3 ms	3,3 ms
22,5	4,3 ms	3,3 ms	3,3 ms
30,0	3,3 ms	3,3 ms	3,3 ms
37,5	3,3 ms	3,3 ms	3,3 ms
45,0	3,3 ms	3,3 ms	3,3 ms
52,5	3,3 ms	6,3 ms	3,3 ms
60,0	3,3 ms	3,3 ms	3,3 ms
67,5	4,3 ms	6,4 ms	3,3 ms
75,0	3,3 ms	4,3 ms	3,3 ms
82,5	3,3 ms	3,3 ms	3,3 ms
90,0	3,3 ms	4,3 ms	3,3 ms
97,5	3,3 ms	3,3 ms	3,3 ms
105,0	3,3 ms	4,3 ms	3,3 ms
112,5	3,3 ms	4,3 ms	3,3 ms
120,0	3,3 ms	4,3 ms	3,3 ms
127,5	5,3 ms	4,3 ms	4,3 ms
135,0	3,3 ms	4,3 ms	4,3 ms

**Ângulo de incidência da falta:** para investigar a influência desse parâmetro, faltas do tipo AT, com  $R_F$  de  $0,001 \Omega$  e localizadas a 75 km da Barra 2 foram aplicadas. No estudo, o ângulo de incidência variou de  $0$  a  $90^\circ$ , com intervalos de  $5^\circ$ . Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 5.4 e conforme se vê, o tempo de detecção não apresenta muitas variações, mas diminui à medida que o ângulo de incidência aumenta.

Tabela 5.4 – Métodos de detecção *versus* ângulo de incidência da falta.

Ângulo de incidência (°)	$t_M$		
	TDQ	TW	INC
0	5,2 ms	9,4 ms	5,2 ms
5	6,1 ms	5,1 ms	5,1 ms
10	4,9 ms	5,9 ms	4,9 ms
15	4,7 ms	4,7 ms	4,7 ms
20	4,4 ms	4,4 ms	4,4 ms
25	6,3 ms	5,2 ms	4,2 ms
30	5,0 ms	5,0 ms	4,0 ms
35	3,7 ms	4,7 ms	4,7 ms
40	4,5 ms	3,5 ms	4,5 ms
45	4,3 ms	4,3 ms	4,3 ms
50	4,1 ms	3,0 ms	4,1 ms
55	4,9 ms	4,9 ms	3,8 ms
60	3,6 ms	3,6 ms	3,6 ms
65	4,4 ms	3,3 ms	3,3 ms
70	3,2 ms	3,2 ms	4,2 ms
75	3,9 ms	3,9 ms	3,9 ms
80	3,7 ms	3,7 ms	3,7 ms
85	4,6 ms	3,5 ms	3,5 ms
90	4,3 ms	4,3 ms	3,3 ms

**Resistência de falta:** para investigar a influência desse parâmetro, faltas do tipo AT, localizadas a 75 km da Barra 2, com ângulo de incidência de 90° foram simuladas. No estudo, a resistência de falta variou de 0,001 a 50  $\Omega$ , com passo de 5  $\Omega$ . Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 5.5 e conforme se vê, o método INC foi o menos afetado.

Com base no exposto, selecionou-se o **método de detecção TDQ**, devido principalmente à sua confiabilidade, visto que apresentou a maior taxa de acerto, e por ter sido menos influenciado pelo local e resistência de falta.

Tabela 5.5 – Métodos de detecção *versus* resistência da falta.

Resistência ( $\Omega$ )	$t_M$		
	TDQ	TW	INC
0,001	3,3 ms	3,3 ms	3,3 ms
5	3,3 ms	3,3 ms	3,3 ms
10	4,3 ms	4,3 ms	3,3 ms
15	3,3 ms	4,3 ms	3,3 ms
20	3,3 ms	4,3 ms	3,3 ms
25	3,3 ms	3,3 ms	3,3 ms
30	3,3 ms	4,3 ms	3,3 ms
35	4,3 ms	4,3 ms	3,3 ms
40	3,3 ms	4,3 ms	3,3 ms
45	3,3 ms	4,3 ms	3,3 ms
50	3,3 ms	4,3 ms	3,3 ms

## 5.2. Seleção do Método de Classificação da Falta

A seleção do método de classificação mais adequado baseou-se na análise das seguintes questões:

- O método conseguiu classificar a falta?
- A classificação foi correta?

Com base nessas questões, três parâmetros foram avaliados:

- Taxa de acerto:

$$TA = \frac{\text{número de classificações corretas}}{\text{número de faltas simuladas}} \times 100\%, \quad (5.3)$$

- Taxa de erro:

$$TE = \frac{\text{número de classificações incorretas}}{\text{número de faltas simuladas}} \times 100\%, \quad (5.4)$$

- Taxa de faltas não classificadas:

$$TF_{nc} = \frac{\text{número de classificações não realizadas}}{\text{número de faltas simuladas}} \times 100\%. \quad (5.5)$$

Adotou-se que a etapa de classificação inicia 2,5 ciclos após a incidência da falta. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.6, da qual conclui-se que: i) o método SC apresentou a maior taxa de acerto e classificou corretamente todas as faltas; iii) o método TW classificou todas as faltas às quais foi submetido, porém apresentou o maior número de faltas classificadas incorretamente; ii) o método TDQ apresentou o maior número de casos nos quais a classificação não foi efetuada.

Tabela 5.6 – Desempenho dos métodos de classificação das faltas.

Método	TA	TE	$TF_{nc}$
TDQ	88,67%	2%	9,33%
TW	96,83%	3,17%	0%
SC	98%	0%	2%

Averiguação do desempenho dos métodos em relação ao tipo de falta foi realizada, cujos resultados são apresentados na Tabela 5.7, na qual a informação sobre as faltas não classificadas foi suprimida. Além disso, as classificações mais recorrentes para cada tipo de falta classificada incorretamente foram adicionadas para complementar a taxa de erro. Como se vê:

- i. O método TDQ obteve seu melhor desempenho para faltas envolvendo mais de uma fase;
- ii. O método TW obteve os melhores resultados para faltas bifásicas-terra e trifásicas;
- iii. O método SC obteve seu pior desempenho para faltas bifásicas.

Em relação aos demais parâmetros, constatou-se que:

- i. A localização e a resistência de falta foram os fatores que mais influenciam no desempenho dos métodos avaliados.
- ii. O método TDQ apresentou os piores resultados quando se utilizou  $R_f = 50 \Omega$ .
- iii. O método TW apresentou os piores resultados para faltas monofásicas e bifásicas de resistência elevada e mais afastadas da Barra 2.

- iv. O método SC não conseguiu classificar faltas bifásicas localizadas à 90% da LT e com  $R_f = 50 \Omega$ .

Tabela 5.7 – Métodos de classificação *versus* tipo de falta.

Tipo de Falta	TA			TE/Outras estimativas		
	TDQ	TW	SC	TDQ	TW	SC
AT	80%	91,67%	100%	-	8,33% ABT, BCT	-
BT	80%	93,33%	100%	-	6,67% CT, ACT	-
CT	81,67%	95%	100%	-	5% AT	-
AB	88,33%	95%	93,33%	-	5% ABC	-
BC	91,67%	95%	93,33%	6,67% AB	5% ABC	-
AC	93,33%	98,33%	93,33%	-	1,67% ABC	-
ABT	96,67%	100%	100%	3,33% AT	-	-
BCT	93,33%	100%	100%	6,67% CT	-	-
ACT	98,33%	100%	100%	1,67% CT	-	-
ABC	83,33%	100%	100%	16,67% AC	-	-

Como o sucesso da etapa de classificação é fundamental para a etapa de localização da falta, selecionou-se o **método de classificação SC**, devido à sua maior taxa de acerto.

### 5.3. Seleção do Método de Localização da Falta

Para avaliação dos métodos de localização das faltas, adotou-se como critério o erro relativo dado por (IEEE, 2014):

$$e_R = \frac{|d - d_r|}{l} \times 100. \quad (5.6)$$

Sendo:  $d$  e  $d_r$  as distâncias estimada e real, respectivamente;  $l$  o comprimento da LT.

Nesta etapa de avaliação, foram consideradas classificações de faltas corretas e sinais de tensão e corrente correspondentes a 2,5 ciclos após o início da falta. A primeira etapa da análise consistiu na observação do erro relativo referente a cada método calculado para cada cenário de falta, que resultou na Tabela 5.8.

O erro médio,  $e_M$ , corresponde à soma dos erros obtidos dividido pelo número de faltas consideradas, para cada tipo de falta simulada. Como os valores obtidos para faltas com resistência de 50  $\Omega$  divergiram consideravelmente do valor real, estes não foram incluídos nos resultados apresentados.

Tabela 5.8 – Métodos de localização *versus* tipo de falta.

Tipo de Falta	$e_M$ (%)		
	Takagi	RS	Eriksson
AT	3,09	1,05	1,68
BT	2,97	0,99	1,56
CT	5,04	0,99	4,40
AB	1,55	0,53	8,18
AC	2,01	0,60	4,75
BC	1,44	0,65	7,99
ABT	1,94	0,42	6,37
ACT	1,09	1,11	3,87
BCT	2,19	1,06	6,15
ABC	1,09	0,49	1,29

Conforme se vê: i) o método RS apresentou o melhor desempenho; ii) o método Takagi apresentou os piores resultados para faltas monofásicas, com erros de aproximadamente 20 km para as faltas mais distantes.

Averiguação do desempenho dos métodos em relação a diversos parâmetros foi realizada, conforme apresentado a seguir

**Local da falta:** para investigar a influência desse parâmetro, faltas do tipo AT, com  $R_F$  de 0,001  $\Omega$  e ângulo de incidência de 90° foram simuladas. No estudo, o local de aplicação da falta variou considerando um passo de 7,5 km, iniciando no quilômetro 15 da Barra 2 da Linha 3, até o quilômetro 135. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.9, da qual se conclui que apenas o método Eriksson foi afetado por esse parâmetro.

Tabela 5.9 – Métodos de localização *versus* local de ocorrência da falta.

Local da Falta (km)	$e_M$ (%)		
	Takagi	RS	Eriksson
15,0	0,22	0,31	1,26
22,5	0,38	0,37	1,89
30,0	0,52	0,42	2,54
37,5	0,60	0,50	3,20
45,0	0,73	0,49	3,85
52,5	0,80	0,51	2,13
60,0	0,85	0,51	1,45
67,5	0,88	0,51	0,77
75,0	0,75	0,62	0,01
82,5	0,78	0,54	0,66
90,0	0,66	0,56	1,35
97,5	0,78	0,32	2,11
105,0	0,64	0,32	2,81
112,5	0,53	0,23	3,57
120,0	0,38	0,12	4,24
127,5	0,14	0,09	5,14
135,0	0,14	0,24	5,85

**Ângulo de incidência da falta:** para investigar a influência desse parâmetro, faltas do tipo AT, com  $R_F$  de  $0,001 \Omega$  e localizadas no meio da LT foram aplicadas. No estudo, o ângulo de incidência variou de  $0$  a  $90^\circ$ , com passo de  $5^\circ$ . Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 5.10, e conforme se vê o método Takagi foi o mais afetado por esse parâmetro.

**Impedância de sequência positiva:** como todos os algoritmos implementados dependem da impedância de sequência positiva da LT, avaliou-se também a influência desse parâmetro. Para isso, faltas do tipo AT localizadas no meio da LT, com resistência  $0,001 \Omega$  e ângulo de incidência  $90^\circ$  foram simuladas considerando diferentes níveis de imprecisão  $\Delta Z_{LT1}$  na impedância de sequência positiva da LT, variando de  $-30\%$  a  $30\%$ . Conforme mostrado na Tabela 5.11, o erro aumenta com a imprecisão dos dados para todos os métodos. Porém, o método Eriksson foi o menos afetado. Essa avaliação corrobora que a localização da falta é afetada significativamente pela precisão dos dados da LT.

Tabela 5.10 – Métodos de localização *versus* ângulo de incidência da falta.

Ângulo de incidência (°)	$e_M$ (%)		
	Takagi	RS	Eriksson
0	1,71	0,31	0,33
5	1,62	0,22	0,52
10	1,60	0,20	0,54
15	1,29	0,02	0,53
20	1,61	0,22	0,49
25	1,23	0,08	0,43
30	1,47	0,08	0,38
35	1,19	0,13	0,33
40	1,05	0,26	0,36
45	0,98	0,34	0,19
50	1,12	0,21	0,25
55	0,95	0,38	0,27
60	1,00	0,33	0,18
65	0,92	0,43	0,16
70	0,90	0,45	0,11
75	0,90	0,45	0,07
80	0,86	0,51	0,04
85	0,85	0,52	0,01
90	0,81	0,57	0,07

Tabela 5.11 – Métodos de localização *versus* imprecisão dos dados da LT.

Imprecisão no dado da LT (%)	$e_M$ (%)		
	Takagi	RS	Eriksson
-30	22,81	20,84	7,29
-25	17,85	16,02	7,22
-20	13,45	11,73	6,39
-15	9,72	8,10	5,02
-10	6,45	4,92	3,45
-5	3,49	2,04	1,63
0	0,74	0,62	0,11
+5	1,49	2,81	1,57
+10	3,74	4,99	3,00
+15	5,81	7,00	4,48
+20	7,56	8,71	5,82
+25	9,23	10,33	7,26
+30	10,75	11,81	8,44

**Resistência de falta:** para investigar a influência desse parâmetro, faltas do tipo AT, localizadas no meio da LT, com ângulo de incidência de 90° foram simuladas. No

estudo a resistência de falta variou de 0,001 a 50  $\Omega$ , com passo de 5  $\Omega$ . Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 5.12 e conforme esperado, os métodos baseados em dados de um terminal têm sua precisão significativamente afetada pela resistência de falta (DALCASTAGNE; ZIMATH, 2008). Constatou-se que o método RS apresentou aumento menos acentuado no erro à medida que a resistência se eleva.

Tabela 5.12 – Métodos de localização *versus* resistência da falta.

Resistência ( $\Omega$ )	$e_M$ (%)		
	Takagi	RS	Eriksson
0,001	0,88	0,49	0,04
5	2,75	2,02	4,02
10	6,96	3,79	8,95
15	11,86	5,94	14,47
20	17,53	8,51	20,51
25	23,99	11,55	27,93
30	31,29	15,10	35,80
35	39,55	19,27	41,65
40	48,62	23,94	38,68
45	41,23	29,34	27,45
50	29,99	35,51	16,34

De modo geral, o método RS foi o mais preciso e confiável entre os três, além de apresentar a implementação mais simples. Sua precisão só é afetada pelos parâmetros da LT e pela resistência de falta. Sendo assim, selecionou-se o **método RS** para ser implementado no relé.

## 5.4. Avaliação do Relé Modelado

O relé de distância modelado neste trabalho possui a seguinte arquitetura e funcionalidades:

- Filtro *anti-aliasing* tipo Butterworth passa-baixa de segunda ordem;
- Filtro de média móvel para eliminação de ruído branco;
- Taxa de amostragem de 16 amostras/ciclo;
- Remoção da componente CC de decaimento exponencial;

- Estimção fasorial pelo método da transformada de Fourier de ciclo completo;
- Detecção da falta por meio da transformada de Park (TDQ);
- Classificação da falta pelo método de Sobrecorrente (SC);
- Localização da falta pelo método da Reatância Simples (RS);
- Cálculo da impedância aparente;
- Característica de atuação tipo mho com duas zonas e polarização por memória de tensão de sequência positiva;
- Característica de atuação tipo quadrilateral com duas zonas e polarização por corrente de sequência negativa;
- Comando para abertura de disjuntor para faltas em 1ª e 2ª zonas.

As funcionalidades implementadas estão organizadas em blocos de hierarquia devidamente nomeados, que servem para separar o circuito em blocos, como pode ser visto na Figura 5.1.

Na tela do módulo `RunTime`, onde são apresentadas as respostas do SEP modelado, são dispostos os principais elementos para análise da falta (Figura 5.2):

- `Switches`, `sliders` e botões para o controle de aplicação de falta;
- Botões para controle de abertura e fechamento manuais do disjuntor;
- Informações referentes ao diagnóstico da falta: tempo de detecção, local, tipo, tempos de *trip* de 1ª e 2ª zonas das características mho e quadrilateral, indicação da zona de atuação;
- Gráficos de tensão e corrente secundárias;
- Gráficos dos estados dos sinais de *trip* e do disjuntor;
- Gráfico com as curvas das características e caminho da impedância.

Figura 5.1 – Disposição dos blocos construídos no módulo Draft.

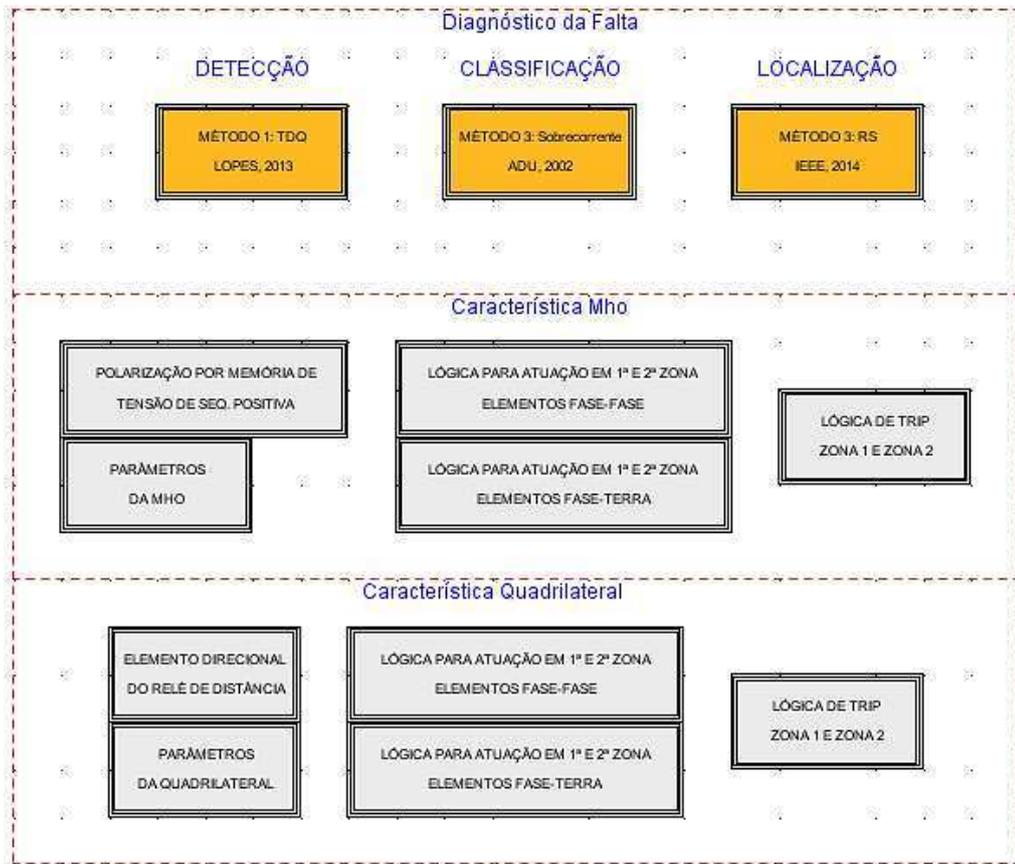
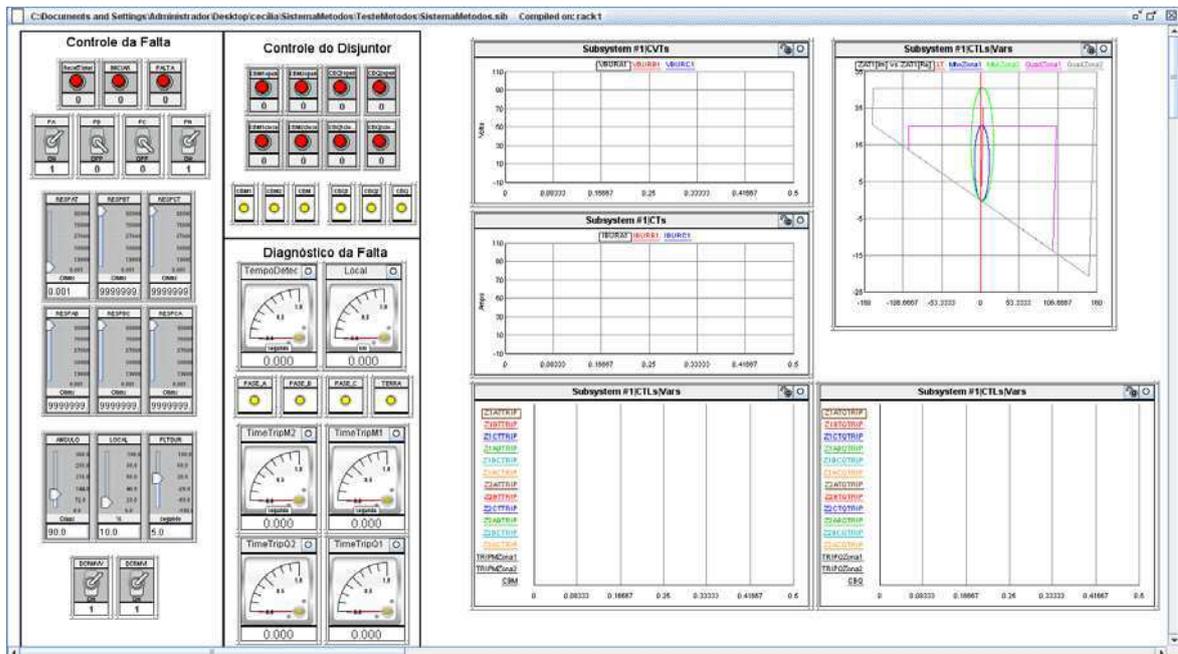


Figura 5.2 – Tela do módulo RunTime para observação das saídas do sistema.

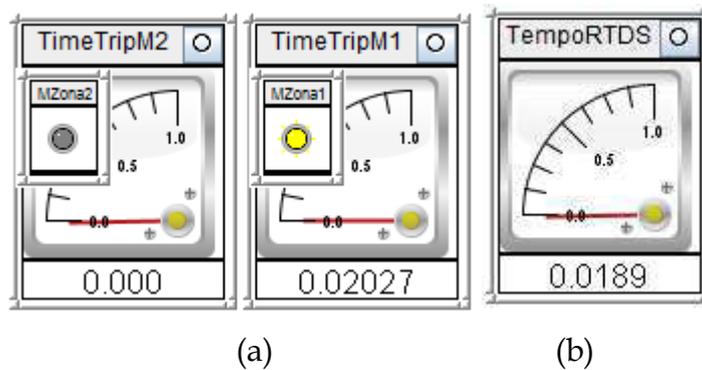


### 5.4.1. Relé Modelado *versus* Relé do RTDS®

Esta etapa consistiu em comparar o relé modelado com o RELÉ\_RTDS. Devido às informações disponibilizadas pelo RELÉ\_RTDS, só foi possível comparar o intervalo de tempo entre a incidência da falta e o sinal de *trip*, o que foi feito observando-se a informação disponível nos medidores no módulo RunTime, a qual se refere a uma falta do tipo AT localizada no meio da LT (Figura 5.3). Infelizmente, o RELÉ\_RTDS não informa a qual característica de operação essa informação se refere.

Figura 5.3 – Medidores de tempo - resultados:

(a) relé modelado; (b) RELÉ\_RTDS.



Cinco casos foram simulados e os resultados são apresentados na Tabela 5.13. Como se vê, o RELÉ\_RTDS apresentou tempos de *trip* inferiores ao relé modelado, porém, a diferença entre ambos é pequena. Portanto, em termos de tempo de *trip*, o relé modelado apresentou resultado satisfatório.

Em relação à zona de atuação, houve uma divergência no Caso 2 (falta tipo AB, local 105 km, resistência 5  $\Omega$  e ângulo 0°), no qual o RELÉ\_RTDS indicou falta em 2ª zona, enquanto o relé modelado indicou corretamente em 1ª zona. Por se tratar de um modelo fechado, não é possível analisar em qual das etapas do RELÉ\_RTDS houve o erro que levou a esse resultado. Em relação à atuação no limite de 1ª zona, os melhores resultados obtidos pelo relé modelado foram para faltas localizadas a +8 km e -8 km do limite, o que corresponde a aproximadamente 5% da LT.

Tabela 5.13 - Relé modelado *versus* RELÉ\_RTDS.

Relé	Tempo de <i>trip</i>				
	Caso 1 ABC 75 km	Caso 2 AB 105 km	Caso 3 ACT 135 km	Caso 4 AT 112 km	Caso 5 AT 128 km
Modelado	19,37 ms (1ª zona)	22,18ms (1ª zona)	219,8ms (2ª zona)	30,55 ms (1ª zona)	219,40 ms (2ª zona)
RELÉ_RTDS	16,75 ms (1ª zona)	208,1ms (2ª zona)	209,3ms (2ª zona)	20,45 ms (1ª zona)	206,75 ms (2ª zona)

Os casos avaliados mostraram que relé modelado: i) identifica a zona de atuação e o tempo de *trip* para cada característica individualmente, o que pode vir a auxiliar um estudo das características de atuação de um relé de proteção; ii) disponibiliza várias informações ao usuário, o que o RELÉ\_RTDS não fornece, as quais são apresentadas de forma clara e direta no módulo RunTime; iii) configura uma “caixa branca”, ou seja, permite que o usuário tenha acesso a todas as etapas que o compõe, e as modifique de acordo com a necessidade do estudo em andamento.

### 5.4.2. Relé Modelado *versus* Relé SEL-311C

Nesta etapa, o relé modelado foi comparado com o relé SEL-311C conectado em malha fechada com o RTDS® por meio da observação do tempo de *trip* e do diagnóstico da falta. Utilizou-se o programa AcSELerator Quickset® para realizar a parametrização do relé de acordo com as características do relé modelado e os dados da LT modelada, seguindo a memória de cálculo disponibilizada pelo fabricante e habilitando-se apenas a função de distância.

As informações referentes ao diagnóstico realizado pelo relé modelado são apresentadas no módulo RunTime conforme mostrado na Figura 5.4, na qual medidores indicam o local da falta e os tempos de detecção e de *trip*, e os indicadores luminosos destacam as fases envolvidas na falta e a zona de atuação de cada característica.

No relé SEL-311C, as oscilografias foram salvas para cada distúrbio. As informações relativas às faltas são apresentadas sucintamente pelo *AcSELerator Analytic Assistant*, conforme mostrado na Figura 5.5. Algumas informações, como zona de atuação e classificação da falta, podem ser observadas no painel frontal do relé, por meio de LEDs indicadores.

Figura 5.4 – Informações do diagnóstico da falta do relé modelado.

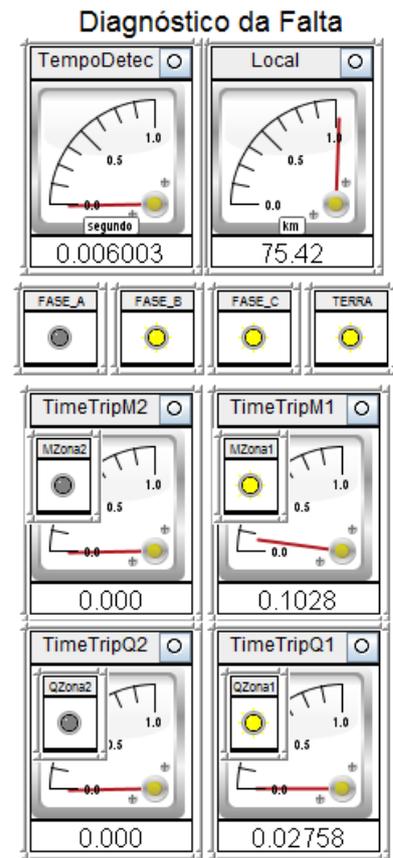


Figura 5.5 – Informações do diagnóstico da falta disponibilizado pelo *AcSELerator Analytic Assistant*.



Após a parametrização, cinco faltas foram simuladas, cujos resultados são apresentados na Tabela 5.14. Ambas as características mho e quadrilateral foram incluídas no relé SEL-311C, porém, diferentemente do relé modelado, o relé SEL-311C não indica a qual delas a zona de atuação se refere.

Análise da Tabela 5.14 mostrou que a diferença no tempo de *trip* não ultrapassou um ciclo para as mesmas zonas de atuação. Em termos de localização, os resultados apresentados pelo relé modelado foram, em alguns casos, melhores que o relé digital. Em relação à atuação próxima ao limite de 1ª zona, houve uma divergência no Caso 5 (falta tipo AT, local 128 km, resistência 0,001 Ω e ângulo 60°), no qual o relé SEL 311-C indicou falta em 1ª zona, enquanto o relé modelado indicou corretamente em 2ª zona, visto que está localizada a 85% da LT.

Tabela 5.14 - Relé modelado *versus* relé SEL-311C.

Caso	Diagnóstico da falta	Relé	
		Modelado	SEL- 311C
Caso 1 BT 135 km	Tempo de <i>trip</i>	21,84 ms	23,38 ms
	Zona de atuação	1ª zona (quad)	1ª zona
	Tipo de falta	BT	BT
	Local de falta	140,40 km	140,48 km
Caso 2 BCT 75 km	Tempo de <i>trip</i>	27,63 ms	20,15 ms
	Zona de atuação	1ª zona	1ª zona
	Tipo de falta	BCT	BCT
	Local de falta	78,43 km	77,02 km
Caso 3 ABC 45 km	Tempo de <i>trip</i>	27,93 ms	17,43 ms
	Zona de atuação	1ª zona	1ª zona
	Tipo de falta	ABC	ABC
	Local de falta	45,83 km	45,98 km
Caso 4 AT 112 km	Tempo de <i>trip</i>	30,55 ms	22,78 ms
	Zona de atuação	1ª zona	1ª zona
	Tipo de falta	AT	AT
	Local de falta	112,40 km	117,00 km
Caso 5 AT 128 km	Tempo de <i>trip</i>	219,40 ms	17,09 ms
	Zona de atuação	2ª zona	1ª zona
	Tipo de falta	AT	AT
	Local de falta	127,80 km	133,05 km

Assim, pode-se afirmar que os resultados apresentados pelo relé modelado são satisfatórios. As diferenças já esperadas nos resultados obtidos são justificadas pelo

fato de que os algoritmos utilizados pelo relé SEL-311C não são os mesmos do relé modelado.

Destaca-se a vantagem do relé modelado em relação à identificação da zona de atuação para cada característica de operação implementada. Além disso, todas as principais informações referentes à falta simulada se encontram disponíveis na janela do módulo `RunTime`, facilitando a visualização por parte do usuário. Por fim, o relé modelado, por ter sido desenvolvido no RTDS<sup>®</sup>, apresenta a vantagem de salvar os sinais de tensão e corrente, bem como os sinais digitais da atuação da proteção, no formato COMTRADE, que podem ser utilizados em outros *softwares*.

# Capítulo 6 - Conclusões

Este trabalho apresentou a modelagem de um relé de distância em um simulador digital em tempo real, o que incluiu: as principais etapas da arquitetura de um relé digital; as características mho e quadrilateral, ambas com duas zonas; o diagnóstico da falta, ou seja: o tempo de detecção e de atuação da proteção, o local e a classificação da falta.

A arquitetura inclui blocos disponibilizados pelo fabricante do simulador, os quais são utilizados para filtragem dos sinais de corrente e tensão, redução da taxa de amostragem desses sinais, remoção da componente CC de decaimento exponencial e estimação fasorial.

Para o diagnóstico da falta, foram implementados nove algoritmos de detecção, classificação e localização de falta (três algoritmos para cada etapa do processo). Optou-se por utilizar métodos desenvolvidos em trabalhos da Universidade Federal de Campina Grande e métodos recorrentes na literatura. A avaliação e comparação de desempenho dos métodos foram realizadas por meio de simulações em massa, de forma automática, de diversos cenários de falta em uma linha de transmissão.

Ao final, foram escolhidos os melhores métodos para comporem o relé de distância modelado no simulador. Em seguida, o relé foi avaliado por meio da comparação de seu desempenho com o modelo oferecido pela biblioteca de componentes do simulador e com o relé digital SEL-311C.

Em relação ao modelo do relé oferecido pelo fabricante do simulador, constatou-se que o relé modelado identifica as principais características da falta e distingue a zona de atuação para cada característica individualmente, além de se constituir em um relé do tipo “caixa branca”, o que permite modificações na sua arquitetura e algoritmos.

Em relação à comparação com o relé digital SEL-311C, observou-se desempenho satisfatório do relé modelado tanto em relação ao diagnóstico da falta quanto em relação ao tempo de *trip*. Outro ponto importante a destacar é a possibilidade da realização de estudos de coordenação da proteção, ou seja, usando conjuntamente o relé modelado com relés reais, explorando desta forma, uma das principais vantagens do RTDS®.

Em relação à ferramenta de simulação, constatou-se seu enorme potencial, como por exemplo: i) existência de uma vasta biblioteca de componentes do SEP; ii) possibilidade de criação, por meio de programação em linguagem C, de novos componentes; iii) *interface* amigável; iv) possibilidade da construção de um modelo de faltas a partir dos componentes de sua biblioteca, o que permite a elaboração de um *script*, no qual as variáveis do modelo são alteradas de forma automática, sem a intervenção do usuário; v) possibilidade de acompanhar a evolução da falta graficamente, inclusive de forma interativa; vi) possibilidade da implementação das etapas do relé de forma separada, bem como a visualização da resposta de cada uma delas.

Visando dar continuidade a esse trabalho, sugerem-se os seguintes estudos.

- Uso do relé modelado em conjunto com um relé digital para o estudo de coordenação da proteção;
- Implementação de um método de localização por dois terminais;
- Realização de uma análise paramétrica e de sensibilidade da influência da componente CC de decaimento exponencial no desempenho do sistema de proteção;
- Implementação de outras funções de proteção, como sobrecorrente, diferencial;
- Inserção de cargas no sistema-teste para avaliação da sua influência no sistema de proteção.

# Referências Bibliográficas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5459: Manobra e Proteção de Circuitos. Rio de Janeiro, 1987.

ADU, T. An accurate fault classification technique for power system monitoring devices. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 17, n. 3, p. 684-690. 2002.

ANDERSON, P. M. *Power System Protection*. Piscataway, NJ - USA: IEEE Press Series on Power Engineering, 1999.

ANEEL. Edital de Leilão N° 006/2008, Anexo 6<sup>a</sup>, Lote A. Características e requisitos técnicos básicos das instalações de transmissão.

ANEEL. Resolução Normativa N° 270/2007. Estabelece as disposições relativas à qualidade do serviço público de transmissão de energia elétrica, associada à disponibilidade das instalações integrantes da rede básica, e dá outras providências.

APOSTOLOPOULOS, C.A. & KORRES, G.N. Real-time implementation of digital relay models using MATLAB/SIMULINK and RTDS. *European Transactions on Electrical Power*, v. 20, n. 3, p. 290-305. 2010.

CALERO, F.; GUZMÁN, A.; BENMOUYAL, G. Elementos de distância quadrilaterais de fase e terra adaptativos. *SEL Journal of Reliable Power*, vol. 1, no. 1, Jul. 2010.

CAMPOS, D.; MORENO, E.; TORRES, D. Test and evaluation time-inverse over-current protection algorithm using SIMULINK. In: *International Conference on Signal Processing*, Istanbul, Turkey, 2008.

COSTA, F. B. Uma técnica de diagnóstico em tempo real de distúrbios transitórios baseada na transformada wavelet para uso em registradores digitais de perturbação. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica. UFCG, 2010.

COSTA, F. B; SOUZA, B. A; BRITO, N. S. D. Real-Time classification of transmission line faults based on maximal overlap discrete wavelet transform. In: IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Orlando, FL. 2012.

COSTA, F. B; SOUZA, B. A; BRITO, N. S. D; SILVA, K. M. Transformada wavelet discreta aplicada ao diagnóstico de distúrbios. In: Anais Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Belém. 2010.

COURY, D.V.; OLESKOVICZ, M. & GIOVANINI, R. Proteção digital de sistemas elétricos de potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes. USP/São Carlos, 2011.

COUTINHO, P. R. L. N. Avaliação de algoritmos para a proteção de distância de linhas de transmissão via simulações tempo real. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UFCG, 2012.

DALCASTAGNE, A.; ZIMATH, S. A study about the sources of error of impedance-based fault location methods. In: IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America. 2008.

DAS, S; SANTOSO, S; GAIKWAD, A; PATEL, M. Impedance-based fault location in transmission networks: theory and application. IEEE Access, vol. 2, 2014, pp. 537-557.

DUBÉ, L; BONFANTI, I. MODELS: A new simulation tool in EMTP. European Transactions on Electrical Power, vol. 2, No. 1, January/February 1992, pp. 45-50.

ELETROBRÁS. Dicionário da energia elétrica. Disponível em: <<http://www.eletrobras.com/elb/data/pages/lumis560528bfptbrie.htm>>. Acesso: 18 nov. 2015.

EMTP. Reference models for transmission line relay testing. 2004.

ERIKSSON, L; SAHA, M. M; ROCKEFELLER, G. D. An accurate fault locator with compensation for apparent reactance in the fault resistance resulting from remote-end infeed. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, no. 2, pp. 424-436, Feb. 1985.

GOH, Y. L.; RAMASAMY, A. K.; NAGI, F. H.; ABIDIN, A. A. Numerical relay for overcurrent protection using TMS320F2818. In: International Conference on Circuits, systems, electronics, control & signal processing, Greece, 2010.

GONÇALVES, D.N. Desempenho do relé de distância em linhas de transmissão compensadas com TCSC. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UFRJ, 2007.

GRIMONI, J. A. B.; ROCHA, T. A. S. L.; LOPES, V. J. S. Sistema de proteção de sobrecorrente modelado em LabVIEW aplicado ao ensino experimental de engenharia elétrica. In: Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, Fortaleza, Brasil, 2010.

GUERRERO, C. A. V. Uso do RTDS em testes de esquemas de teleproteção aplicando o padrão IEC 61850. Dissertação em Engenharia Elétrica, UNIFEI, 2011.

GUIGUER, S. Proteção de sistemas aéreos de distribuição. Porto Alegre: Sagra, 1988. 344p.

HEO, J.Y.; KIM, C.H.; SO, K.H. & PARK, N.O. Realization of distance relay algorithm using EMTP models. In: International Conference on Power System Transients, New Orleans, USA, 2003.

IEEE guide for determining fault location on AC transmission and distribution lines, New York, 2014.

IEEE Power System Relaying Committee. EMTP reference models for transmission line relay testing. 61 p. 2004.

JANÍČEK, F. & MUCHA, M. Distance digital relay model developed in ATP “foreign model” and C++. Journal of Electrical Engineering, v. 57, n. 5, p. 268-275. 2006.

JAVA. Disponível em: < [https://www.java.com/pt\\_BR/about/](https://www.java.com/pt_BR/about/)>. Acesso em: 15 jul. 2016.

KEZUNOVIC, M.; KASZTENNY, B. New SIMULINK libraries for modeling digital protective relays and evaluating their performance under fault transients. In: International Conference on Power Systems Transients, Budapest, Hungary, 1999.

KINDERMANN, G. Proteção de sistemas elétricos de potência. Florianópolis. 1999.

LEUVEN EMTP CENTER, ATP - Alternative Transients Program: Rule Book. Heverlee, Belgium, 1987.

LIMA, M.M.M. Alguns fatores afetando o desempenho de relés de distância. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UFRJ, 2006.

LOPES, F. V. Localização de faltas em tempo real baseada na teoria de ondas viajantes usando dados não sincronizados de dois terminais. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica. UFCG, 2014.

LOPES, F. V; BARROS, D; REIS, R; COSTA, C; NASCIMENTO, J; BRITO, N; NEVES, W; MORAES, S. Influência de métodos de estimação fasorial no processo de análise de faltas no sistema CHESF. In: Conferência Brasileira Sobre Qualidade de Energia Elétrica, Campina Grande, Brasil, 2015.

LOPES, F. V; FERNANDES Jr., D; NEVES, W. L. A. A Traveling-WAVE DETECTION METHOD BASED ON Park's transformation for fault location. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 28, No. 3, pp. 1626-1634. (2013).

LOPES, F. V; FERNANDES Jr., D; NEVES, W. L. A. Classificação de faltas em linhas de transmissão via transformada de Park. In: Anais Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Foz do Iguaçu. 2014.

MACHADO, E. P. Compensação dinâmica dos transitórios de baixa frequência de transformadores de potencial capacitivos para otimização da proteção de linhas de transmissão. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica. UFCG, 2013.

MEER, A. Directional relay co-ordination in ungrounded medium voltage radial distribution networks using a Real-Time Digital Simulator. Master of Science Thesis, Delft University of Technology, 2008.

MREHEL, O.G.; ELFETORI, H.B.; HAWAL, A.O. Implementation and evaluation a SIMULINK model of a distance relay in MATLAB/SIMULINK. In: International Conference on Electrical and Eletronics Engineering, Istanbul, Turkey, 2013.

NAGARAJU, K; VARMA, P. S. V. S. T; VARMA, B. R. K.A Current-slope based fault detector for digitl relays. In: Annual IEEE India Conference, Hyderabad, 2011.

NATIONAL INSTRUMENTS. Disponível em: <<http://www.ni.com/labview/pt/>>. Acesso em: 15 jul. 2016.

ONS. Glossário de Termos Técnicos. 2008.

OUELLETTE, D.S.; GEISBRECHT, W.J.; WIERCKX, R.P. & FORSYTH, P.A. Modeling an impedance relay using a real time digital simulator. In: IEE International Conference on Developments in Power System Protection, 2004.

PAITHANKAR, Y. G.; BHIDE, S.R. Fundamentals of power system protection. Prentice-Hall, 2007.

PHADKE, A. G.; THORP, J. S. Computer relaying for power system. 2. Ed. Chichester, West Sussex, England: John Wiley & Sons, 2009.

ROBERTS, J.; GUZMAN, A. &SCHWEITZER, E.O.  $Z = V/I$  does not make a distance relay. In: Annual Western Protective Relay Conference, 1993.

RTDS Technologies Inc. [Online] Disponível em: <<https://www.rtds.com>>. Acesso: 15 jun. 2016.

RTDS Technologies. Real time digital simulator tutorial manual (RSCAD Version). Canada, 2015.

SÁ, J.A.; COSTA, F.B.; OLIVEIRA, N.L.S.; BRITO, N.S.D.; SOUZA, B.A.; GURJÃO, E.C. & CARMO, U.A. Uso de simulador em tempo real no ensino de proteção de sistemas elétricos. In: Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 2010.

SAHA, M. M.; IZYKOWSKI, J. J.; ROSOLOWSKI, E. Fault location on power network. Power Systems. London: Ed. Springer, 2010.

SANTO, S. E; RANÇA, V. A. B; ALMEIDA, H. H. Testing a protection system using the rtds™ batch mode facility. In: International Conference on Power Systems Transients, Rio de Janeiro, Brasil, 2001.

SARAN, A. Real time modeling, simulation and validation of protective relays. Master of Science in Electrical Engineering Thesis, Mississippi State University, 2009.

SEL - Schweitzer Engineering Laboratories, Comercial LTDA. Memória de cálculo para os ajustes do relé de proteção SEL-311C.

SEL - Sistema de Proteção e Automação SEL-311C. Data sheet SEL-311C. 2006.

SILVA, C. H. C. Desenvolvimento de um laboratório virtual para capacitação tecnológica a distância em proteção de sistemas elétricos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UFC, 2011.

SILVA, K.M. Estimação de fasores baseada na transformada wavelet para uso na proteção de distância de linhas de transmissão. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica. UFCEG, 2009.

SILVA, M.G.M. Avaliação de desempenho de relés de proteção digitais. Projeto de Graduação. UFRJ, 2012.

TAKAGI, T; YAMAKOSHI, Y; YAMAURA, M; KONDOW, R; MATSUSHIMA, T. Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, no. 8, pp. 2892-2898, Aug. 1982.

WU, LI-CHENG; LIU, CHIH-WEN & CHEN, CHING-SHAN. Modeling and testing of a digital distance relay using MATLAB/SIMULINK. In: Annual North American Power Symposium, 2005.

ZIMMERMAN, K; COSTELLO, D. Impedance-based fault location experience. In: 31<sup>st</sup> Annual Western Protective Relay Conference, 2004.