UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO–USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Renato Machado Monaro

**Lógica Fuzzy Aplicada na Melhoria da
Proteção Digital de Geradores
Síncronos**

São Carlos
2013

Renato Machado Monaro

**Lógica Fuzzy Aplicada na Melhoria da
Proteção Digital de Geradores
Síncronos**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Tit. Denis Vinicius Coury

Coorientador: Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior

São Carlos

2013

Trata-se da versão corrigida da tese. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

M7341 Monaro, Renato Machado
 Lógica Fuzzy Aplicada na Melhoria da Proteção
 Digital de Geradores Síncronos / Renato Machado Monaro;
 orientador Denis Vinicius Coury; coorientador José
 Carlos de Melo Viera Júnior. São Carlos, 2013.

 Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas
Elétricos de Potência -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2013.

 1. Geradores Síncronos. 2. Falhas Internas. 3.
Proteção. 4. Sistemas Elétricos de Potência. 5. Lógica
Fuzzy. 6. Real Time Digital Simulator. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **RENATO MACHADO MONARO**.

Título da tese: "Lógica *fuzzy* aplicada na melhoria da proteção digital de geradores síncronos".

Data da defesa: 28/02/2013

Comissão Julgadora:

Prof. Titular **Denis Vinicius Coury (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **José Carlos de Melo Vieira Júnior**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Giovanni Manassero Junior**
(Escola Politécnica/USP)

Prof. Dr. **Walmir de Freitas Filho**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Prof. Associado **Alexandre Cláudio Botazzo Delbem**
(Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação/USP)

Resultado:

APROVADO

APROVADO

APROVADO

APROVADO

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

Protocolado em 28/02/2013
Serviço de Pós-Graduação
EESC/USP

Agradecimentos

A Deus pela oportunidade deste aprendizado.

Aos meus pais Djair e Abia e a minha irmã Riciane pelo apoio incondicional.

A Raquel por suas palavras de apoio e carinho.

A Universidade de São Paulo (USP) pela excelência de ensino.

Ao Prof. Dr. Denis Vinicius Coury que na figura de orientador norteou os passos deste trabalho.

Ao Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior pela, co-orientação, apoio e tempo dedicado ao desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Om P. Malik pela supervisão durante o estágio na *University of Calgary* e Garwin pela ajuda na montagem laboratorial conduzida na mesma instituição.

Aos Professores Dr. Diógenes Pereira Gonzaga, Dr. José Roberto Boffino de Almeida Monteiro e Dr. Mario Oleskovicz pelas consultorias técnicas.

Ao Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica (LSEE), pela acomodação e equipamentos disponibilizados no desenvolvimento desse trabalho.

Aos meus colegas e amigos do LSEE especialmente a Raphael, Gustavo, Vinicius, Hermes, Daniel e Ulisses que contribuíram das mais diversas maneiras ao desenvolvimento desta pesquisa.

Aos amigos de São Carlos, Amilcar, Giovani, Guido, Suetake, Marcel e Moussa pela companhia e momentos de alegria.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC)-USP que de algum modo colaboraram com trabalho desenvolvido, em especial a Alessandro, César, Odair e Rui Bertho, cujo auxílio viabilizou a condução dos ensaios laboratoriais.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de doutorado e pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estágio no exterior que proporcionou a coleta de dados e troca de experiências na *Schulich School of Engineering, University of Calgary*.

*“Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram
no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino.”*

Leonardo da Vinci

Resumo

MONARO, R. M. **Lógica Fuzzy Aplicada na Melhoria da Proteção Digital de Geradores Síncronos.** 177 p. Tese de doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2013.

Este trabalho propõe um novo método de proteção de geradores síncronos baseado em inteligência artificial, mais especificamente lógica fuzzy, com o propósito de melhorar a proteção destes componentes vitais aos sistema elétricos de potência. Um sistema elétrico de potência completo composto por geradores, linhas de transmissão e cargas foi simulado através do *Real Time Digital Simulator* para fornecer dados para realização de testes e validação do algoritmo de proteção inteligente. Adicionalmente, foram desenvolvidos dois esquemas experimentais que proporcionaram a obtenção de um conjunto extensivo de ensaios de faltas internas em dois geradores síncronos reais, com o objetivo de fornecer dados para comprovar a eficácia da proteção proposta. Um sistema integrado de *software* e *hardware* cujo objetivo é servir de plataforma para desenvolver e executar em tempo real algoritmos de proteção aplicados foi desenvolvido. Esse sistema integrado foi utilizado nos testes embarcados em tempo-real do algoritmo de proteção desenvolvido. Apresenta-se também um arranjo composto por funções de proteção tradicionais mais utilizadas em campo, as quais serviram como base de comparação de desempenho para o esquema de proteção inteligente desenvolvido. Os resultados apresentados mostram que o método de proteção inteligente proposto é mais sensível para detectar instantaneamente faltas fase-terra em geradores síncronos com aterramento de alta-impedância, além de ser capaz de identificar faltas entre-espiras e entre-caminhos.

Palavras-chave: Geradores Síncronos, Faltas Internas, Proteção, Sistemas Elétricos de Potência, Lógica Fuzzy, *Real Time Digital Simulator*.

Abstract

MONARO, R. M. **Fuzzy Logic Applied in Synchronous Generators Digital Protection Improvement.** 177 p. Ph.D. Thesis – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2013.

This work presents the development of a synchronous generator protective technique based on artificial intelligence, specifically fuzzy logic, in order to improve the protection of these vital components of the electric power system. A complete electric power system composed of generators, transmission lines and loads was simulated using the Real Time Digital Simulator to provide data for testing and validating the intelligent protection algorithm. Additionally, an extensive set of internal fault experiments conducted on two actual synchronous generators provided oscillograms to demonstrate the proposed protection effectiveness. An integrated hardware and software system whose purpose is to serve as a platform for developing and executing real-time protection algorithms is presented. This integrated system was used for real-time embedded testing of the protection algorithm developed. An arrangement composed of traditional protection functions most used in the field is also presented, this arrangement served as a comparison basis for the intelligent protection scheme performance. The results show that the intelligent protection is more sensitive to detect instantly ground faults in synchronous generators with high-impedance grounding, it is also shown that the proposed scheme is able to identify inter-turns and inter-circuits faults.

Keywords: Synchronous Generators, Internal Faults, Protection, Electric Power System, Fuzzy Logic, Real Time Digital Simulator.

Lista de siglas

API *Application Programming Interface*

ATP *Alternative Transients Program*

CA Corrente Alternada

CAD Conversor Analógico Digital

CAPES Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CC Corrente Contínua

CDA Conversor Digital Analógico

CF *Compact Flash*

CI Circuito Integrado

DSP *Digital Signal Processor*

EESC Escola de Engenharia de São Carlos

FACTS *Flexible AC Transmission System*

FANN *Fast Artificial Neural Network Library*

FIFO *First In First Out*

FPAA *Field Programmable Analogic Array*

GPL *General Public License*

GS Gerador Síncrono

IAC *Inverse Alternate Current*

IEEE *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

IEC *International Electrotechnical Commission*

LF *Lógica Fuzzy*

LSEE Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica

MCC Motor de Corrente Contínua

PAD Placa de Aquisição de Dados

PC *Personal Computer*

PCI Placa de Circuito Impresso

PI Proporcional Integral

PSS *Power System Stabilizer*

PTC *Positive Temperature Coefficient*

PWM *Pulse Width Modulation*

RCT Regulador de Constante de Tempo

RNA Rede Neural Artificial

RTAI *Real-Time Application Interface*

RTDS *Real-Time Digital Simulator*

RTHAL *Real Time Hardware Abstraction Layer*

SEP Sistema Elétrico de Potência

SF Sistema *Fuzzy*

SO Sistema Operacional

SSE *Schulich School of Engineering*

TC Transformador de Corrente

TDF Transformada Discreta de Fourier

TF Transformada de Fourier

TP Transformador de Potencial

TPC Transformador de Potencial Capacitivo

TW Transformada *Wavelet*

UCF Unidade de Controle de Faltas

UCM Unidade de Controle das Máquinas

UCS Unidade de Condicionamento de Sinais

Lista de símbolos

δ_{ay}	Ângulo mútuo ente as fases a e $y = b, c$
δ_{xx}	Ângulo próprio da fase $x = a, b, c$
ω	Velocidade angular de G_1^E ou G_1^R
τ_{do}''	Constante de tempo sub-transitória em vazio de eixo direto
τ_d''	Constante de tempo sub-transitória de eixo direto
τ_{qo}''	Constante de tempo sub-transitória em vazio de eixo em quadratura
τ_{do}'	Constante de tempo transitória em vazio de eixo direto
τ_d'	Constante de tempo transitória de eixo direto
τ_a	Constante de curto-circuito
τ_{do}	Constante de tempo em vazio de eixo direto
B	Coeficiente de atrito viscoso
G_1^E	Gerador síncrono do sistema EESC submetido a faltas internas
G_1^S	Gerador síncrono do sistema SSE submetido a faltas internas
G_n^R	Geradores síncronos do sistema RTDS
H	Constante de inércia
i_{fd}	Corrente de campo de G_1^E , G_1^S ou G_1^R
i_f	Corrente de falta de G_1^E ou G_1^R
i_n	Corrente instantânea no neutro de G_1^E , G_1^S ou G_1^R
i_x^n	Corrente instantânea da fase $x = a, b, c$ próxima ao neutro de G_1^E , G_1^S ou G_1^R
I_x^o	Corrente de operação da fase $x = a, b, c$
I_x^r	Corrente de restrição da fase $x = a, b, c$

i_x^t	Corrente instantânea da fase $x = a, b, c$ próxima aos terminais de G_1^E , G_1^S ou G_1^R
J	Momento de inércia
K	Constante de proporcionalidade
L_a	Indutância de armadura
M_1^E	Motor de corrente contínua do sistema EESC, fonte motriz de G_1^E
M_1^S	Motor de corrente contínua do sistema SSE, fonte motriz de G_1^S
R_0	Resistência de sequência zero
R_2	Resistência de sequência negativa
R_a	Resistência de armadura
R_n	Resistência de aterramento
R_a	Resistência de armadura
R_{fd}	Resistência de campo
V_{fd}	Tensão de campo
v_f	Tensão instantânea de falta com referência ao terra de G_1^E ou G_1^R
v_n	Tensão instantânea no neutro de G_1^E , G_1^S ou G_1^R com referência ao terra
v_{xn}	Tensão instantânea da fase $x = a, b, c$ de G_1^E , G_1^S ou G_1^R com referência ao terra
X_0	Reatância de sequência zero
X_2	Reatância de sequência negativa
X_d	Reatância síncrona de eixo direto não saturada
X_d'	Reatância transitória de eixo direto não saturada
X_d''	Reatância sub-transitória de eixo direto não saturada
X_l	Reatância de dispersão não saturada
X_q	Reatância síncrona de eixo em quadratura não saturada
X_q''	Reatância sub-transitória de eixo em quadratura não saturada

Lista de tabelas

Tabela 1	Potência e Tensão Nominais dos Geradores Síncronos do Sistema RTDS	36
Tabela 2	Características Elétricas da Máquina Síncrona G_1^R	37
Tabela 3	Características Elétricas das Máquinas Síncronas G_2^R , G_4^R e G_5^R	37
Tabela 4	Características Elétricas da Máquina Síncrona G_3^R	38
Tabela 5	Constantes do Regulador e Turbina à Gás do Sistema RTDS	38
Tabela 6	Constantes dos Reguladores e Turbinas à Vapor do Sistema RTDS	38
Tabela 7	Constantes do Sistema de Excitação e Controle de Tensão de G_1^R	40
Tabela 8	Constantes do Sistema de Excitação e Controle de Tensão de $G_k^R \forall k = 2..5$	40
Tabela 9	Lista de Linhas de Transmissão do Sistema RTDS	41
Tabela 10	Dados Construtivos das Linhas de Transmissão do Sistema RTDS	41
Tabela 11	Cargas Conectadas às Barras do Sistema RTDS	42
Tabela 12	Parâmetros dos Transformadores de Potencial do Sistema RTDS	43
Tabela 13	Curva de Magnetização dos Transformadores de Potencial do Sistema RTDS	43
Tabela 14	Parâmetros dos Transformadores de Corrente do Sistema RTDS	45
Tabela 15	Curva de Magnetização dos Transformadores de Corrente do Sistema RTDS	45
Tabela 16	Pontos de Operação do Sistema RTDS	47
Tabela 17	Resistências de Aterramento Utilizadas no Sistema RTDS	47
Tabela 18	Características Elétricas da Máquina Síncrona G_1^E	57
Tabela 19	Características Elétricas da Máquina de Corrente Contínua M_1^E	59
Tabela 20	Parâmetros do Equivalente de Linha	60
Tabela 21	Parâmetros da Linha de Transmissão de 138kV	60
Tabela 22	Lista das Faltas Fase-Terra	67
Tabela 23	Lista das Faltas Fase-Fase	67
Tabela 24	Lista das Faltas entre Caminhos	67
Tabela 25	Lista das Faltas Entre-Espiras	68
Tabela 26	Características Elétricas do Gerador Síncrono da SSE	69
Tabela 27	Parâmetros do Equivalente Linha de 500 kV	70
Tabela 28	Parâmetros Reais de cada Seção π	70

Tabela 29	Resistências de aterramento utilizadas no Sistema EESC	74
Tabela 30	Resistências de aterramento utilizadas no Sistema SSE	75
Tabela 31	Parâmetros do Controle de Potência Reativa (Sistema EESC)	76
Tabela 32	Parâmetros do Controle de Potência Reativa (Sistema SSE)	76
Tabela 33	Parâmetros do Controle de Potência Ativa (Sistema EESC)	77
Tabela 34	Parâmetros do Controle de Potência Ativa (Sistema SSE)	78
Tabela 35	Pontos de Operação do Sistema EESC	78
Tabela 36	Pontos de Operação do Sistema SSE	78
Tabela 37	Medições Elétricas Realizadas Durante os Ensaios	79
Tabela 38	Parâmetros da Proteção Diferencial	109
Tabela 39	Parâmetros da Proteção de Sobrecorrente de Fase Instantânea	110
Tabela 40	Parâmetros da Proteção de Sobrecorrente de Neutro	110
Tabela 41	Tempo de Execução da Etapa de Aquisição	113
Tabela 42	Tempo de Execução da Etapa de Medição	114
Tabela 43	Tempo de Execução da Etapa de Proteção	114
Tabela 44	Precisão da Taxa de Amostragem	115
Tabela 45	Tempos de Atuação (Falta C-Terra)	119
Tabela 46	Tempos de Atuação (Falta A-B)	119
Tabela 47	Regras <i>Fuzzy</i> para Proteção Instantânea	133
Tabela 48	Regras <i>Fuzzy</i> para Proteção Temporizada	135
Tabela 49	Ajustes da Proteção Diferencial	142
Tabela 50	Área Cega da Proteção <i>Fuzzy</i> e Tradicional para Faltas Fase-Terra no Sistema RTDS	145
Tabela 51	Área Cega da Proteção <i>Fuzzy</i> e Tradicional para Faltas Fase-Terra no Sistema EESC	145
Tabela 52	Área Cega da Proteção <i>Fuzzy</i> e Tradicional para Faltas Fase-Terra no Sistema SSE	145
Tabela 53	Número de Acertos na Identificação Instantânea de Faltas	146
Tabela 54	Respostas das Proteções <i>Fuzzy</i> e Tradicional para Faltas Entre-Caminhos	147
Tabela 55	Respostas das Proteções <i>Fuzzy</i> e Tradicional para Faltas Entre-Espiras	148
Tabela 56	Número de Acertos na Identificação Temporizada de Faltas	148
Tabela 57	Tempo de Atuação das Proteções	150
Tabela 58	Tempo de Execução da Etapa de Aquisição (T_{aqu})	153
Tabela 59	Tempo de Execução da Etapa de Pré-Processamento (T_{pre})	153
Tabela 60	Tempo de Execução da Etapa de Proteção (T_{pro})	154
Tabela 61	Tempo de Execução da Etapa de Lógica (T_{log})	155

Lista de ilustrações

Figura 1	Exemplo de Simulação em Tempo-Real em Laço Fechado com RTDS	35
Figura 2	Diagrama Unifilar do Sistema RTDS	36
Figura 3	Diagrama de Blocos da Turbina à Gás e Regulador de Velocidade do Sistema RTDS	38
Figura 4	Diagrama de Blocos do Regulador de Velocidade da Turbina à Vapor do Sistema RTDS	39
Figura 5	Diagrama de Blocos da Turbina à Vapor do Sistema RTDS	39
Figura 6	Diagrama de Blocos do Sistema de Excitação e Controle de Tensão de G_1^R	40
Figura 7	Diagrama de Blocos do Sistema de Excitação e Controle de Tensão de $G_k^R \forall k = 2..5$	40
Figura 8	Desenho da Torre de Transmissão do Sistema RTDS	42
Figura 9	Modelo do Transformador de Potencial do RTDS	43
Figura 10	Curva de Magnetização dos Transformadores de Potencial do Sistema RTDS	44
Figura 11	Estrutura Física e Modelo Elétrico dos Transformadores de Corrente do RTDS	44
Figura 12	Curva de Magnetização dos Transformadores de Corrente do Sistema RTDS	45
Figura 13	Disposição dos TPs e TCs para o Monitoramento de G_1^R	46
Figura 14	Pontos de Operação das Simulações de Falta (Sistema RTDS)	47
Figura 15	Oscilografia de Falta Trifásica na Barra 6 do Sistema RTDS (grandezas medidas nos terminais de G_1^R)	48
Figura 16	Oscilografia de Falta Fase-Fase-Terra na Barra 1 do Sistema RTDS (grandezas medidas nos terminais de G_1^R)	49
Figura 17	Oscilografia de Falta Fase-Terra na Barra 13 do Sistema RTDS (grandezas medidas nos terminais de G_1^R)	50
Figura 18	Oscilografia de Falta Fase-Terra Interna em G_1^R do Sistema RTDS (grandezas medidas nos terminais de G_1^R)	51
Figura 19	Conexões das Máquinas Elétricas para os Ensaios	57
Figura 20	Foto da Montagem das Máquinas	57

Figura 21	Posição das Derivações nos Enrolamentos da Armadura do Gerador Síncono	59
Figura 22	Foto da Placa de Aquisição de Dados Utilizada	61
Figura 23	Circuito de Condicionamento de Tensão	61
Figura 24	Circuito de Condicionamento de Corrente	63
Figura 25	Unidade de Condicionamento de Sinais	63
Figura 26	Blocos Funcionais da Unidade de Controle de Faltas	64
Figura 27	Unidade de Controle de Faltas	64
Figura 28	Blocos Funcionais da Unidade de Controle das Máquinas	65
Figura 29	Unidade de Controle das Máquinas	65
Figura 30	Tipos de Faltas	66
Figura 31	Conexões das Máquinas Elétricas para os Ensaios	68
Figura 32	Fotos do Sistema SSE	69
Figura 33	Foto da Placa de Aquisição de Dados Utilizada na SSE	71
Figura 34	Garra Amperimétrica Utilizada na Medição de Corrente na SSE	71
Figura 35	Dispositivo de Inserção de Faltas	73
Figura 36	Configuração de Medidas para Faltas em G_1^S	73
Figura 37	Circuitos de Sequência	74
Figura 38	Diagramas de Blocos dos Controles de Potência Reativa	76
Figura 39	Diagrama de Blocos dos Controles de Potência Ativa	77
Figura 40	Pontos de Operação dos Ensaios de Falta	78
Figura 41	Esquemático para Avaliar o Controle do Ângulo de Incidência de Falta	81
Figura 42	Teste do Controle do Ângulo de Falta	81
Figura 43	Respostas dos Controles de Potência Ativa	82
Figura 44	Respostas dos Controles de Potência Reativa	83
Figura 45	Oscilografia de Falta Fase-Terra (Fase A) do Sistema EESC	84
Figura 46	Oscilografia de Falta Entre-Espiras (Fase A) do Sistema EESC	84
Figura 47	Oscilografia de Falta Fase-Fase (Fase A-C) do Sistema EESC	85
Figura 48	Oscilografia de Falta Entre Caminhos (Fase A) do Sistema EESC	86
Figura 49	Oscilografia de Falta Fase-Terra Interna (Fase B 25%) do Sistema SSE	87
Figura 50	Oscilografia de Falta Fase-Fase Externa (Linha de Transmissão 50%) do Sistema SSE	87
Figura 51	Arquitetura do RTAI	93
Figura 52	Organização do Comedi	94
Figura 53	Organização da Biblioteca <i>OpenRelay</i>	95
Figura 54	Fluxo de Execução da Biblioteca <i>OpenRelay</i>	96
Figura 55	<i>Buffer</i> Circular	97
Figura 56	Tipos de Canais	97
Figura 57	Exemplo de Decomposição Seletiva Usando <i>Wavelet Packet</i>	102

Figura 58	Vista e Dimensões de Módulos PC104	105
Figura 59	Visão do Conjunto	106
Figura 60	Principais Subsistemas de um Relé Digital.	106
Figura 61	Cubo PC104	108
Figura 62	Representação do SEP analisado	109
Figura 63	Funções de Proteção e Lógica de Atuação	110
Figura 64	Disposição dos TCs para proteção diferencial	111
Figura 65	Teste Embarcado em Plataforma PC104	111
Figura 66	Teste do Relé Comercial	112
Figura 67	Tempo de Execução dos Algoritmos de Proteção	113
Figura 68	Tempo de Execução	114
Figura 69	Dispersão do Erro de Amostragem	116
Figura 70	Resposta das Funções de Proteção (Falta C-Terra) <i>Cubo PC104</i>	116
Figura 71	Resposta das Funções de Proteção (Falta C-Terra) <i>Relé Comercial</i> . .	117
Figura 72	Resposta das Funções de Proteção (Falta A-B) <i>Cubo PC104</i>	117
Figura 73	Resposta das Funções de Proteção (Falta A-B) <i>Relé Comercial</i>	118
Figura 74	Visão Geral do Sistema <i>Fuzzy</i> para Proteção de Geradores Síncronos. .	128
Figura 75	Funções de Pertinência de $\Delta\delta_{aa}$	131
Figura 76	Funções de Pertinência de I_a^o	131
Figura 77	Funções de Pertinência de ΔI_a^r	132
Figura 78	Funções de Pertinência de sF_a	132
Figura 79	Sistema de Confirmação de Falta	134
Figura 80	Funções de Pertinência de $\Delta\delta_{ab}$	135
Figura 81	Funções de Pertinência de $\Delta\delta_{ac}$	135
Figura 82	Funções de Pertinência de sF_t	135
Figura 83	Funcionamento do Subsistema <i>Fuzzy</i> Temporizado em Caso de Operação Normal	137
Figura 84	Funcionamento do Subsistema <i>Fuzzy</i> Temporizado em Caso Falta . . .	138
Figura 85	Funcionamento do Subsistema <i>Fuzzy</i> Instantâneo em Caso de Operação Normal	140
Figura 86	Funcionamento do Subsistema <i>Fuzzy</i> Instantâneo em Caso Falta	141
Figura 87	Funções de Proteção e Lógica de Atuação.	143
Figura 88	Curva Característica de Operação para a Proteção Diferencial	143
Figura 89	Ilustração do Esquema de Teste em Laço Fechado	149
Figura 90	Oscilografia da Resposta da Proteção Tradicional para o Teste em Laço Fechado	150
Figura 91	Oscilografia da Resposta da Proteção <i>Fuzzy</i> para o Teste em Laço Fechado	151
Figura 92	Tempo de Execução dos Algoritmos de Proteção <i>Fuzzy</i> e Tradicional. .	152
Figura 93	Tempo de Processamento do Sistema de Inferência <i>Fuzzy</i>	154

Figura 94	Visão Geral do Tempo de Processamento das Proteções Tradicional e <i>Fuzzy</i>	156
Figura 95	Etapas de Montagem de G_1^E	169
Figura 96	Enrolamento Planificado do Gerador Síncrono G_1^E	170
Figura 97	Circuito do Regulador de Constante de Tempo	172
Figura 98	Circuito Simplificado do Regulador de Constante de Tempo	172
Figura 99	Exemplo de Funções de Pertinência	176
Figura 100	Diagrama de um Sistema <i>Fuzzy</i>	177

Sumário

1	Introdução	27
1.1	Objetivos	29
1.2	Estrutura do Trabalho	29
1.3	Divulgação do Trabalho	30
2	Simulação de Faltas em Geradores Síncronos via Simulador Digital em Tempo Real	33
2.1	<i>Real-Time Digital Simulator</i>	33
2.2	Descrição do Sistema Simulado	35
2.2.1	Geradores Síncronos	36
2.2.2	Linhas de Transmissão	41
2.2.3	Cargas	41
2.2.4	Sistema de Medição	42
2.3	Simulação de Faltas	46
2.4	Oscilografias das Simulações de Falta	48
3	Ensaio de Faltas Internas em Geradores Síncronos	53
3.1	Revisão Bibliográfica	54
3.2	Sistema de Ensaio de Faltas da Escola de Engenharia de São Carlos	56
3.2.1	Gerador Síncrono	56
3.2.2	Motor de Corrente Contínua	58
3.2.3	Linha de Transmissão	60
3.2.4	Sistema de Medição e Controle do Ensaio	60
3.2.5	Pontos de Falta	65
3.3	Sistema de Ensaio de Faltas da <i>Schulich School of Engineering</i>	68
3.3.1	Gerador Síncrono	68
3.3.2	Motor de Corrente Contínua	69
3.3.3	Linha de Transmissão	70
3.3.4	Sistema de Medição e Controle do Ensaio	70
3.3.5	Pontos de Falta	72
3.4	Discussão sobre a Conexão e Aterramento dos Geradores Síncronos	73

3.5	Ensaaios de Falta	75
3.5.1	Controle dos Pontos de Carregamento	75
3.5.2	Ângulo de Inserção de Falta	78
3.5.3	Medidas Elétricas Realizadas em G_1^E e G_1^S	79
3.5.4	Sequência de Execução dos Ensaaios de Falta	79
3.6	Resultados e Discussão	80
3.6.1	Controle do Ângulo de Falta	80
3.6.2	Controle da Potência Ativa Fornecida por G_1^E e G_1^S	81
3.6.3	Controle da Potência Reativa Fornecida/Consumida por G_1^E e G_1^S	82
3.6.4	Oscilografias dos Ensaaios de Falta	82
4	Plataforma de Desenvolvimento e Teste em Tempo Real de Algoritmos de Proteção	89
4.1	Revisão Bibliográfica	89
4.2	Biblioteca <i>OpenRelay</i>	91
4.2.1	Sistemas Operacionais de Tempo Real	91
4.2.2	<i>Comedi: Common Measurement Device Interface</i>	93
4.2.3	Organização da Biblioteca	94
4.2.4	Classe <i>Relay</i> e Fluxo de Execução	95
4.2.5	Classe <i>Channel</i>	96
4.2.6	Classe <i>Acquisition</i>	98
4.2.7	Classe <i>Measure</i>	99
4.2.8	Classe <i>Protection</i>	102
4.2.9	Classe <i>Logic</i>	103
4.2.10	Classe <i>Oscilography</i>	103
4.2.11	Classe <i>Display</i>	104
4.3	<i>Cubo PC104</i>	104
4.3.1	A Plataforma PC104	105
4.3.2	Composição do <i>Cubo PC104</i>	106
4.4	Avaliação do Funcionamento do <i>Cubo PC104</i> e da Biblioteca <i>OpenRelay</i>	108
4.4.1	O Sistema Elétrico Analisado	108
4.4.2	Funções de Proteção Teste	109
4.4.3	Resultados	112
5	Proteção Inteligente de Geradores Síncronos	121
5.1	Revisão Bibliográfica	121
5.1.1	Proteção Diferencial	121
5.1.2	Proteção Contra Falhas Fase-Terra	123
5.1.3	Proteção Contra Falhas Entre-espiras	126
5.2	Sistema <i>Fuzzy</i> para Proteção de Geradores Síncronos	127

5.2.1	Seleção de Atributos para o Sistema <i>Fuzzy</i>	128
5.2.2	Sub-sistema <i>Fuzzy</i> Instantâneo	130
5.2.3	Sub-sistema <i>Fuzzy</i> Temporizado	133
5.3	Resultados da Proteção Inteligente de Geradores Síncronos	136
5.3.1	Análise Funcional do Sistema <i>Fuzzy</i>	136
5.3.2	Proteção Convencional de Geradores Síncronos	142
5.3.3	Análise de Desempenho do Sistema de Proteção <i>Fuzzy</i>	143
5.3.4	Teste em Tempo Real em Laço Fechado	148
6	Considerações Finais	157
6.1	Continuação da Pesquisa	159
	Referências	161
APÊNDICE A	Detalhes Construtivos de G_1^E	169
APÊNDICE B	Regulador de Constante de Tempo	171
APÊNDICE C	Lógica <i>Fuzzy</i>	175

Introdução

A geração, transmissão e distribuição de energia elétrica continuam entre os mais desafiadores e excitantes campos da engenharia elétrica. As evoluções tecnológicas necessárias ao desenvolvimento da sociedade são altamente dependentes de um seguro, confiável e econômico fornecimento de energia elétrica.

A ampliação permanente do Sistema Elétrico de Potência (SEP) traz uma série de novos desafios, já que seus reflexos repercutem diretamente nos padrões de qualidade, de confiabilidade e de continuidade de fornecimento da energia elétrica. Assim, observa-se a necessidade do sucessivo aperfeiçoamento das técnicas e procedimentos que regem a operação, a manutenção e a expansão da rede elétrica.

Em um SEP é de fundamental importância a rápida e precisa detecção de anomalias, ou seja, a indicação de situações faltosas ou de condições anormais, para que estas possam ser rapidamente eliminadas buscando a volta das condições normais de operação. Como fato para ilustrar a importância de uma bem ajustada proteção do sistema, uma atuação indevida de seus dispositivos pode dar origem a um efeito de desligamento em cascata, atingindo diversas partes do sistema, o qual poderá culminar em um *blackout* de forma generalizada. Como quantificação imediata dos problemas causados, têm-se prejuízos econômicos aos consumidores residenciais, comerciais e industriais que utilizam a energia elétrica em seus sistemas, bem como danos materiais ao SEP como um todo, pois situações faltosas prolongadas podem danificar seus componentes. Portanto, quanto maior a eficiência na detecção e isolamento das situações anormais, mais estável será o sistema elétrico de uma maneira geral.

Entre os equipamentos a serem protegidos, destacam-se os Geradores Síncronos (GSs) devido ao seu elevado custo e perdas financeiras causadas por paradas não programadas, além de serem as principais máquinas utilizadas em sistemas de geração de energia de grande porte, como usinas hidroelétricas e termoeletricas. A proteção deste importante equipamento é realizada por meio de diversas filosofias, sendo as principais baseadas em relés de sobrecorrente, relés diferenciais, relés de subtensão, relés de sobretensão, relés de subfrequência, relés de sobrefrequência e monitoramento direto da temperatura dos

enrolamentos (REIMERT, 2006).

Um dos principais defeitos contra o qual um gerador síncrono deve ser protegido é a ocorrência de curtos-circuitos internos aos enrolamentos do estator. Este tipo de defeito, se não eliminado rapidamente, pode provocar danos à máquina de maneira direta pela elevada intensidade de corrente de falta. Mesmo em casos que a intensidade da corrente de falta seja insuficiente para sobreaquecer os enrolamentos, este tipo de defeito deixa a máquina vulnerável, pois caso ocorra uma segunda falha em outra parte do enrolamento, a intensidade da corrente de falta poderá causar danos severos ao equipamento. O principal dispositivo de proteção contra faltas internas é o relé diferencial percentual (INSTITUTE of ELECTRICAL and ELECTRONICS ENGINEERS, 2006b). Muito embora os relés diferenciais percentuais digitais contem com recursos tecnológicos que os tornam muito mais eficientes que os seus antepassados eletromecânicos, tais como a possibilidade de múltiplas inclinações (*slope*) para a característica de atuação (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI, 2007), eles têm algumas limitações para alguns tipos de curtos-circuitos. Como exemplo, cita-se a ocorrência de curtos-circuitos entre espiras de um mesmo enrolamento que não é detectável pelo relé diferencial, pois não há o aparecimento de correntes diferenciais. Para detectar esse tipo de defeito, um arranjo complexo deve ser aplicado (INSTITUTE of ELECTRICAL and ELECTRONICS ENGINEERS, 2006b). Adicionalmente, Reimert (2006) mostra que a atuação do relé diferencial é influenciada pelo carregamento do gerador.

Uma outra limitação do relé diferencial percentual é a incapacidade de detectar curtos-circuitos fase-terra na totalidade dos enrolamentos do estator. Para este tipo de defeito, dois cenários devem ser analisados. Se o neutro do gerador síncrono for aterrado por baixa impedância, o relé diferencial conseguirá detectar faltas fase-terra em 95% do enrolamento, deixando os 5% mais próximos do neutro desprotegidos. Por outro lado, se o gerador for aterrado por uma alta impedância, uma falta fase-terra pode não produzir corrente diferencial com intensidade suficientemente elevada para ativar o relé. O primeiro caso tem sido exaustivamente abordado na literatura técnica, sendo que algumas soluções propostas empregam técnicas de inteligência artificial (JIAJIE; NENGLING; CHEN, 2007; MEGAHED; MALIK, 1999). Já no segundo caso, a proteção é realizada pela conexão de um relé de sobretensão de sequência zero em paralelo com a impedância de aterramento do gerador (STEIN; LINDERS, 1977; SCHLAKE; BUCKLEY; MCPHERSON, 1981; GUOPEI et al., 2000; REIMERT, 2006; INSTITUTE of ELECTRICAL and ELECTRONICS ENGINEERS, 2006b; INSTITUTE of ELECTRICAL and ELECTRONICS ENGINEERS, 2006a). Neste tipo de arranjo, a proteção não consegue distinguir faltas fase-terra internas de externas ou pode atuar no caso de desbalanceamento de cargas que também produza tensão de sequência zero. Assim, torna-se necessário temporizar a ação desta proteção para garantir a coordenação entre as proteções do SEP.

Portanto, visando contribuir para a melhoria da proteção digital de GSs, esta pesquisa propõe um novo sistema de proteção inteligente para atuar na detecção de diferentes tipos

de faltas internas nos enrolamentos do estator do GS. Tal ferramenta será baseada em inteligência artificial, especificamente a Lógica *Fuzzy* (LF) (PEDRYCZ, 1993).

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um sistema inteligente de proteção de geradores síncronos, baseado em lógica *fuzzy*, que melhore a proteção deste importante equipamento do sistema elétrico de potência, superando as deficiências encontradas na proteção convencional. O sistema proposto deve ser capaz de identificar faltas entre-espiras e entre-caminhos e ser mais sensível na detecção de faltas fase-terra. Para a concretização deste intento foi necessário atingir alguns objetivos secundários, listados a seguir:

- ❑ A composição de um extenso banco de oscilografias de situações de faltas. Parte das oscilografias foram obtidas através da simulação de um SEP completo. Outra parte das oscilografias foi coletada através de ensaios de faltas internas em dois GSs reais. Essa base de oscilografias alimentou os testes dos algoritmos de proteção tradicional e inteligente.
- ❑ O desenvolvimento de uma biblioteca de *software* contendo as principais funções de proteção tradicionais de SEPs, com especial atenção às funções de proteção de GSs.
- ❑ A proposição de um conjunto de *hardware* com o intuito de servir de plataforma para testes embarcados em tempo real de novos algoritmos de proteção.

1.2 Estrutura do Trabalho

O Capítulo 2 apresenta a simulação em tempo-real de um SEP completo composto por geradores, linhas de transmissão e cargas para fornecer dados para realização de testes e validação preliminar do algoritmo de proteção inteligente proposto neste trabalho. O SEP simulado foi submetido a vários tipos de faltas em distintos pontos do sistema e em diversas condições de carregamento. Adicionalmente, estas simulações em tempo-real propiciaram o teste embarcado em laço fechado do algoritmo de proteção *fuzzy* proposto neste trabalho. Neste trabalho foi considerado teste em laço fechado (equivalente ao termo *hardware-in-loop* do inglês) aquele composto por dois equipamentos interligados. No qual, um dos equipamentos é responsável pela simulação de um SEP e o outro é responsável pela execução dos algoritmos de proteção. O primeiro, através de simulação de transitórios e de uma interface de saída, envia as formas de ondas para o segundo. Este processa os sinais de entrada, executa o algoritmo nele embarcado e retorna ao primeiro equipamento o resultado do processamento do algoritmo. E por fim, a informação enviada pelo segundo equipamento ao primeiro modifica o comportamento do SEP simulado, fechando o laço.

Para fornecer dados reais para a avaliação do desempenho das técnicas tradicionais e da nova técnica de proteção inteligente de GSs, optou-se por um conjunto de ensaios em dois GSs reais. O Capítulo 3 mostra os detalhes dos sistemas, método de ensaios e controles empregados.

O Capítulo 4 apresenta o desenvolvimento de um sistema integrado de *software* e *hardware* cujo objetivo é servir de plataforma para desenvolver e executar em tempo real algoritmos de proteção aplicados a sistemas elétricos. O objetivo deste sistema é reduzir o tempo de desenvolvimento de novas funções de proteção, possibilitando a execução de testes em tempo real.

O algoritmo de proteção inteligente que busca a melhoria da proteção de GSs é apresentado no Capítulo 5. Primeiramente uma revisão bibliográfica apresenta as principais técnicas de proteção utilizadas na proteção dos enrolamentos de armadura de GS e os trabalhos mais relevantes publicados sobre o assunto na comunidade científica especializada. Em seguida apresenta-se um arranjo composto por funções de proteção tradicionais mais utilizadas em campo, para servir como base de comparação de desempenho para o esquema de proteção inteligente desenvolvido. Depois, o esquema de proteção inteligente, baseado em LF, é apresentado em detalhes. Por fim, os resultados obtidos nos testes da proteção inteligente são apresentados. Os resultados obtidos são comparados com a resposta obtida pela proteção convencional. Também, mostra-se o teste embarcado em tempo real do esquema de proteção inteligente proposto neste trabalho.

Por fim, as considerações finais e as recomendações para a continuidade da pesquisa são apresentadas no Capítulo 6.

Ressalta-se que como os capítulos desta tese tratam de assuntos diversos optou-se em colocar a revisão bibliográfica de cada assunto no início do respectivo capítulo para facilitar a leitura e o entendimento.

1.3 Divulgação do Trabalho

Ao longo deste trabalho de pesquisa alguns trabalhos científicos foram publicados. O sistema de ensaio abordado no Capítulo 3 foi o foco de um artigo publicado em Outubro de 2012 na revista *IEEE Transactions on Energy Conversion* (MONARO et al., 2012c). O sistema de *hardware* utilizado como plataforma de teste para algoritmos de proteção, mostrado no Capítulo 4 foi alvo de um artigo divulgado na revista *Controle & Automação da Sociedade Brasileira de Automática* em Abril de 2012 (MONARO et al., 2012b). A plataforma de teste serviu como base para o desenvolvimento de um trabalho que emprega Redes Neurais Artificiais (RNAs) para a detecção e correção da saturação de Transformadores de Corrente (TCs) em tempo real para a melhoria da proteção diferencial de GSs; o qual foi apresentado no *IEEE Power and Energy Society General Meeting* que ocorreu em Julho de 2012 em São Diego-CA (MONARO et al., 2012a). A plataforma

de testes também foi utilizada para o desenvolvimento e validação em tempo real de algoritmos de proteção de sobre corrente apresentado no IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos que aconteceu em Maio de 2012 em Goiânia-GO (MORO; MONARO; VIEIRA, 2012).

Simulação de Faltas em Geradores Síncronos via Simulador Digital em Tempo Real

Um SEP completo composto por geradores, linhas de transmissão e cargas foi simulado para fornecer dados para realização de testes e validação preliminar do algoritmo de proteção inteligente proposto neste trabalho. Para realizar essa simulação foi utilizado um simulador digital em tempo real (KUFFEL et al., 1995). Deste ponto em diante neste documento, será empregado o termo *Real-Time Digital Simulator* (RTDS) cuja características e princípio de funcionamento são introduzidos neste capítulo. O SEP simulado foi submetido a vários tipos de faltas em distintos pontos do sistema e em diversas condições de carregamento. O foco das simulações de faltas recaiu sobre um dos GSs do SEP simulado. Neste capítulo são mostradas todas as etapas da simulação realizada, incluindo os controles utilizados. O uso do RTDS propiciou o teste em tempo real em laço fechado do algoritmo de proteção proposto.

2.1 *Real-Time Digital Simulator*

No passado, simuladores analógicos foram usados para realizar simulações em tempo real. Eram usados componentes passivos em escala reduzida como resistores, indutores e capacitores, para representar as características elétricas dos componentes do SEP. Os modelos dos componentes eram configurados e conectados manualmente para compor o sistema em estudo. Como os modelos de fontes e geradores funcionam na frequência do sistema, os simuladores analógicos operam por natureza em tempo real.

Como opção aos simuladores analógicos, programas de computador para simulação de transitórios eletromagnéticos estão disponíveis há algumas décadas e são um método bem aceito para estudar os fenômenos que ocorrem no SEP. Na verdade, os recursos de modelagem dos modernos programas de simulação de transitórios eletromagnéticos,

tais como EMTP, ATP e PSCAD/EMTDC são capazes de representar fielmente o SEP. Os programas de simulação se baseiam em modelos matemáticos que representam cada componente do SEP, deste modo o usuário pode interconectar esses modelos para formar um SEP completo para estudo.

O algoritmo desenvolvido por Dommel (1969) é a solução mais utilizada pelos programas de simulação de transitórios eletromagnéticos. Esse algoritmo usa o método de integração trapezoidal para converter equações diferenciais, resultado da análise nodal do SEP, em equações algébricas. O método computacional para a solução da integração trapezoidal necessita que a solução seja computada para instantes discretos de tempo, ao invés de uma solução contínua. O intervalo tempo entre duas soluções discretas é chamado de passo de integração. O valor típico do passo de integração utilizado para simulação de SEP, que garante a convergência da maioria dos modelos numéricos, varia entre 50 e 75 μs . Todas as equações que representam o SEP devem ser resolvidas para cada passo de integração. Para sistemas complexos a solução de cada passo de integração pode levar vários segundos. Neste caso, a simulação não é feita em tempo real. No entanto, se o computador for capaz de realizar continuamente todos os cálculos para um passo de integração em um intervalo de tempo menor ou igual ao passo de integração, a simulação é dita de tempo real. O RTDS é uma espécie de computador que combina um *hardware* e *software* especializado para alcançar a simulação em tempo real.

O RTDS é um simulador de SEPs totalmente digital capaz de funcionar continuamente em tempo real. Ele realiza simulações de transitórios eletromagnéticos de SEPs com passo de integração de 50 μs . Com tal velocidade de processamento e um conjunto de *hardware* dedicado é possível obter saídas analógicas e digitais que reproduzem com fidelidade as condições de um sistema real. Através de suas interfaces com o meio externo é possível obter e controlar variáveis internas da simulação (MAGUIRE; GIESBRECHT, 2005).

Com as características citadas anteriormente o RTDS é capaz de executar simulações em laço fechado, possibilitando o teste e avaliação de algoritmos de proteção, e auxiliando nas parametrizações dos relés de proteção. Dessa forma, pode-se observar os impactos da atuação dos relés de proteção sobre o sistema elétrico, em tempo real. A Figura 1 ilustra o esquema de simulação em laço fechado. A interação entre os elementos apresentados na Figura 1 se dá da seguinte forma: o RTDS envia sinais elétricos de $\pm 10 V$ em suas saídas analógicas, que representam as grandezas elétricas do SEP em simulação e o relé de proteção envia os sinais de abertura para os disjuntores simulados. No entanto, os relés de proteção trabalham com tensões de entrada de $\pm 115 V$ e correntes de $\pm 5 A$. Logo, para alimentar o relé de proteção com sinais oriundos do RTDS é necessária uma etapa de amplificação. Além da interface por meio de sinais analógicos e digitais, o RTDS pode simular comunicações através do protocolo IEC-61850 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2003), sendo que esta característica é de fundamental importância para estudos das novas tecnologias envolvidas na digitalização e automação

de subestações.

Figura 1 – Exemplo de Simulação em Tempo-Real em Laço Fechado com RTDS

2.2 Descrição do Sistema Simulado

O sistema simulado via RTDS para fornecer dados para o desenvolvimento da nova técnica de proteção é inspirado em um sistema de doze barras desenvolvido pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) para estudos de *Flexible AC Transmission Systems* (FACTSs) (JIANG; ANNAKAGE; GOLE, 2006; JIANG, 2010). Esse sistema contava originalmente com doze barras das quais seis de 230 kV, duas de 340 kV e quatro de 22 kV. O sistema de transmissão conta com sete linhas de transmissão com comprimento entre 100 e 600 km. Além disso o sistema é composto por sete transformadores de potência. O sistema possuía quatro GSs, conjuntos de cargas em cinco barras e um sistema FACTS conectado a um dos barramentos de 340 kV. Para esse trabalho esse sistema foi ligeiramente modificado, remove-se o dispositivo FACTS e adicionou-se um outro GS, foco da simulação. A Figura 2 mostra o sistema utilizado para simulação de faltas em um GS.

O sistema foi proposto originalmente para o estudo da aplicação de dispositivos FACTS para melhorar a estabilidade do SEP. Para tanto, os GSs foram dimensionados para operar em seus limites de fornecimento de potência ativa e principalmente de potência reativa. Logo, este não permitia uma grande variação da potência ativa e reativa despachada pelos GSs sem que o mesmo entrasse em colapso de tensão ou frequência. Deste modo, para possibilitar uma maior flexibilidade no controle do carregamento do GS em estudo e não descaracterizar demasiadamente o sistema original, o novo GS (G_1^R na Figura 2) foi inserido na barra onde se encontrava o GS de maior porte. Desta maneira a influência de sua inserção no sistema foi minimizada. Os componentes principais do sistema utilizado serão discutidos ao longo desta seção.

Figura 2 – Diagrama Unifilar do Sistema RTDS

2.2.1 Geradores Síncronos

Os geradores utilizados no sistema simulado são todos GSs de dois polos. A Tabela 1 mostra a potência e tensão nominal dos geradores. Todos os GSs são conectados ao SEP por meio de um transformador elevador fechado em Δ/Y com o lado Δ conectado aos geradores.

Tabela 1 – Potência e Tensão Nominais dos Geradores Síncronos do Sistema RTDS

Máquina	Potência	Tensão
G_1^R	234 MVA	18 kV
G_2^R	700 MVA	22 kV
G_3^R	500 MVA	22 kV
G_4^R	500 MVA	22 kV
G_5^R	800 MVA	22 kV

A maior parte dos modelos de máquinas síncronas empregados nos principais programas de simulação de transitórios eletromagnéticos é baseada na transformada de $dq0$ (KRAUSE; WASYNCZUK; SUDHOFF, 1995). Essa transformada faz uso da natureza simétrica dos enrolamentos do estator. Entretanto, uma falta interna divide o enrolamento em duas seções e a simetria deixa de existir entre a fase em falta e os outros enrolamentos. Logo, a simplificação matemática obtida pela transformada de $dq0$ deixa de existir. Então, para a simulação de faltas internas é mais conveniente lançar mão do modelo equivalente por fase que comporta as assimetrias entre os enrolamentos do gerador inse-

ridas pelas faltas (SUBRAMANIAM; MALIK, 1971; MARTI; LOUIE, 1997; REICHMEIDER et al., 2000; MUTHUMUNI; DIRKS, 2000).

G_1^R foi a máquina escolhida para simular as faltas internas e externas para a coleta de dados, para tanto usou-se o modelo de máquina síncrona disponível no RTDS que possibilita faltas fase-terra em uma das fases do GS. Esse modelo foi desenvolvido por Dehkordi et al. (2009) e as faltas podem ser aplicadas entre 5% e 95% da fase A. Esse modelo não contempla nenhum outro tipo de falta. Os parâmetros elétricos deste GS são mostrados na Tabela 2 e refletem um equipamento real e em operação do sistema brasileiro, na qual X_d é a reatância síncrona de eixo direto não saturada, X'_d é a reatância transitória de eixo direto não saturada, X''_d é a reatância sub-transitória de eixo direto não saturada, X_q é a reatância síncrona de eixo em quadratura não saturada, X''_q é a reatância sub-transitória de eixo em quadratura não saturada, R_a é a resistência de armadura, τ'_{do} é a constante de tempo transitória em vazio de eixo direto, τ''_{do} é a constante de tempo sub-transitória em vazio de eixo direto, τ''_{qo} é a constante de tempo sub-transitória em vazio de eixo em quadratura, X_l é a reatância de dispersão não saturada e H é a constante de inércia.

Tabela 2 – Características Elétricas da Máquina Síncrona G_1^R

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
X_d	2,12 p.u.	X'_d	0,26 p.u.	X''_d	0,195 p.u.
X_q	2,02 p.u.	X''_q	0,195 p.u.	R_a	0,0017 Ω
τ'_{do}	5,7 s	τ''_{do}	0,034 s	τ''_{qo}	0,069 s
X_l	0,15 p.u.	H	4,844 s		

O modelo numérico para simular as máquinas $G_k^R \forall k = 2, 3, 4, 5$ usa a representação $dq0$ para a solução das equações diferenciais destes GSs. As características elétricas e mecânicas de G_2^R , G_4^R e G_5^R são idênticas e podem ser observadas na Tabela 3. Os dados referentes a G_3^R são mostrados na Tabela 4.

Tabela 3 – Características Elétricas das Máquinas Síncronas G_2^R , G_4^R e G_5^R

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
X_d	1,50 p.u.	X'_d	0,40 p.u.	X''_d	0,25 p.u.
X_q	1,20 p.u.	X''_q	0,25 p.u.	R_a	0,00125 Ω
τ'_{do}	5,00 s	τ''_{do}	0,05 s	τ''_{qo}	0,06 s
X_l	0,120 p.u.	H	5,0 s		

Segundo Boldea (2006), a operação adequada dos sistemas de potência de corrente alternada é obtida quando a frequência e tensão se mantêm praticamente constantes ou variam de maneira limitada e controlada quando as cargas ativas e reativas se modificam. Na busca da simulação de SEP mais próxima possível adicionou-se à cada um dos GS os controles de tensão e frequência.

Tabela 4 – Características Elétricas da Máquina Síncrona G_3^R

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
X_d	1,40 p.u.	X'_d	0,30 p.u.	X''_d	0,20 p.u.
X_q	1,35 p.u.	X'_q	0,25 p.u.	R_a	0,00125 Ω
τ'_{do}	6,00 s	τ''_{do}	0,05 s	τ''_{qo}	0,05 s
Xl	0,100 p.u.	H	3,0 s		

2.2.1.1 Fontes Motrizes e Reguladores de Velocidade

Como os GS deste sistema são todos de dois polos optou-se por fontes motrizes que tenham na velocidade angular de operação de 3600 rpm. Foram utilizadas turbinas à vapor como fontes motrizes de $G_k^R \forall k = 2, 3, 4, 5$ e uma turbina à gás para movimentar G_1^R . O diagrama de blocos da turbina à gás, fonte motriz de G_1^R , e seu respectivo regulador de velocidade é mostrado na Figura 3 (NAGPAL et al., 2001). As constantes usadas podem ser consultadas na Tabela 5, o modelo e os parâmetros refletem o equipamento real utilizado para movimentar G_1^R .

Figura 3 – Diagrama de Blocos da Turbina à Gás e Regulador de Velocidade do Sistema RTDS

Tabela 5 – Constantes do Regulador e Turbina à Gás do Sistema RTDS

R	T_1	T_2	T_3	K_t	T_{amb}	P_{max}	P_{min}
0,025 p.u.	0,40 s	0,10 s	3,0 s	2,0	0,90 p.u.	1,4 p.u.	0,0 p.u.

Os modelos das turbinas à vapor (Figura 5) e seus reguladores de velocidade (Figura 4) são baseados no *IEEE Type 1 Speed Governor and Steam turbine model* (INSTITUTE of ELECTRICAL and ELECTRONICS ENGINEERS, 1973). A Tabela 6 mostra as constantes utilizadas.

Tabela 6 – Constantes dos Reguladores e Turbinas à Vapor do Sistema RTDS

T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	K
1,0 s	1,0 s	0,1 s	0,32 s	10,0 s	0,13 s	0,12 s	20,0
K_1	K_3	K_5	K_7	U_c	U_o	P_{max}	P_{min}
0,27	0,0	0,25	0,48	-0,5 p.u./s	0,1 p.u./s	2,0 p.u.	0,4 p.u.

Figura 4 – Diagrama de Blocos do Regulador de Velocidade da Turbina à Vapor do Sistema RTDS

Figura 5 – Diagrama de Blocos da Turbina à Vapor do Sistema RTDS

Nestes diagramas de blocos ω representa a velocidade angular do gerador, P_{ref} é a referência de potência, que pode ser usada para o controle de potência ativa, U_o e U_c são, respectivamente, as velocidades máximas de fechamento e abertura da válvula, P_{max} e P_{min} são os limites de abertura da válvula e T_{amb} é a temperatura ambiente limite.

2.2.1.2 Excitatrizes e Reguladores de Tensão

As usinas de energia modernas contam com sistemas de energia de emergência para os sistemas auxiliares que podem ser utilizados para iniciar a planta depois de um *blackout*. Essa facilidade dá espaço para o uso das excitatrizes estáticas, que em sua maioria são retificadores controlados que alimentam diretamente o enrolamento de campo dos GSs (BOLDEA, 2006). Para o SEP simulado foi adotado o sistema de excitação estática para todos os GSs.

O modelo de excitação e controle de tensão aplicado em G_1^R foi baseado no *IEEE ST4B* (INSTITUTE of ELECTRICAL and ELECTRONICS ENGINEERS, 2006c), esse modelo foi escolhido pois é mais adequado para representar o sistema de excitação e controle de tensão encontrado na planta onde foi instalado. A Figura 6 e Tabela 7 mostram, respectivamente, o digrama de bloco e as contantes do modelo utilizado.

Para os GSs G_2^R , G_3^R , G_4^R , G_5^R foi utilizado o modelo de excitatriz estática e controle de tensão definido como *ST1A* pelo INSTITUTE of ELECTRICAL and ELECTRONICS ENGINEERS (2006c). O diagrama de blocos deste modelo e as constantes usadas podem ser consultados na Figura 7 e na Tabela 8.

Nos diagramas das Figuras 6 e 7 tem-se que V_c é a tensão nos terminais dos GSs, V_S é a entrada da ação do estabilizador de sistema de potência ou *Power System Stabilizer*

(PSS), V_{ref} é a tensão de referência que pode ser usada para controlar potência reativa fornecida/consumida pelo GS, e E_{fd} e I_{fd} são, respectivamente, a tensão e corrente de campo do GS.

Tabela 7 – Constantes do Sistema de Excitação e Controle de Tensão de G_1^R

K_{PR}	K_{IR}	V_{Rmax}	V_{Rmin}	T_a	K_{PM}	K_{IM}	K_g	K_P	K_I	K_C
3,06	3,06	1,0 p.u.	-0,87 p.u.	0,01 s	1,0	0,0	0,0	6,54	0,0	0,08

Tabela 8 – Constantes do Sistema de Excitação e Controle de Tensão de $G_k^R \forall k = 2..5$

V_{Imax}	V_{Imin}	T_C	T_B	T_{C1}	T_{B1}
∞ p.u.	$-\infty$ p.u.	1,0 s	10,0 s	0,0 s	0,0 s

K_A	T_A	V_{Amax}	V_{Amin}	K_{LR}	K_F	T_F
200,0	0,4 s	5,1 p.u.	-4,0 p.u.	0,0	0,03	1,0 s

Figura 6 – Diagrama de Blocos do Sistema de Excitação e Controle de Tensão de G_1^R Figura 7 – Diagrama de Blocos do Sistema de Excitação e Controle de Tensão de $G_k^R \forall k = 2..5$

2.2.2 Linhas de Transmissão

O sistema de transmissão é composto por sete linhas de transmissão. A Tabela 9 mostra as barras interconectadas pelas linhas, assim como a classe de tensão e comprimento das linhas de transmissão. A nomenclatura das linhas está de acordo com a Figura 2. Como pode ser observado seis das linhas de transmissão trabalham com tensão de 230 kV e uma com tensão de 345 kV. As estruturas das linhas de 230 kV são iguais mudando somente o comprimento destas. Os dados construtivos utilizados nas simulações das linhas de 230 kV e 345 kV estão na Tabela 10. A Figura 8 traz uma ilustração de uma torre de transmissão para facilitar a identificação das distâncias físicas destacadas da Tabela 10. A linha de transmissão *LT6* é formada por duas linhas em paralelo.

Tabela 9 – Lista de Linhas de Transmissão do Sistema RTDS

Linha	LT1	LT2	LT3	LT4	LT5	LT6.1	LT6.2	LT7
Tensão (kV)	230	230	230	230	230	230	230	345
Comprimento (km)	100	300	300	100	100	300	300	600
Conexão (Barras)	1-2	2-5	5-4	1-6	6-4	3-4	3-4	7-8

Tabela 10 – Dados Construtivos das Linhas de Transmissão do Sistema RTDS

Tensão (kV)	230	345
H (m)	14,4	17,53
V (m)	1,22	3,50
W (m)	5,49	7,25
S (m)	3,05	4,65
D (m)	3,81	5,0
Cond. por fase	1	2
B (m)	-	0,46
Tipo de Cabo	954ACSR 54/7	795ACSR 26/19
Número de Cabos Terras	2	2
Flecha (m)	5,94	7,92
Flecha Cabo Terra (m)	4,45	7,25
Res. do Solo ($\Omega.km$)	100	100

2.2.3 Cargas

Em algumas das barras foram conectadas cargas do tipo RL para representar centros consumidores da energia gerada pelos GSs. Em três barras (4, 5 e 6) foram colocadas bancos de capacitores para a correção de fator de potência e melhoria do perfil de tensão do sistema. A Tabela 11 sumariza os dados das cargas simuladas, ressalta-se que a potência das cargas e banco de capacitores foram calculadas para os valores nominais de tensão e frequência.

Figura 8 – Desenho da Torre de Transmissão do Sistema RTDS

Tabela 11 – Cargas Conectadas às Barras do Sistema RTDS

Barra	2	3	4	5	6
Tensão (kV)	230	230	230	230	230
Carga Ativa (MW)	280	320	320	100	440
Carga Reativa (Mvar)	200	240	240	60	300
Comp. Capac. (Mvar)	-	-	160	80	180

2.2.4 Sistema de Medição

Nos SEPs faz-se uso de transdutores para reduzir a magnitude da tensão e corrente a fim de realizar medição e proteção. Os relés de proteção trabalham em sua maioria com tensões de entrada de 115 V e corrente de 5 A para sistema americano e 1 A para o sistema europeu (MCDONALD, 2003). Os transdutores de tensão são divididos em duas classes:

- ❑ Transformador de Potencial (TP): São aplicados para tensões até 138 kV;
- ❑ Transformador de Potencial Capacitivo (TPC): Usam um divisor capacitivo para reduzir a tensão que alimenta um transformador de potencial comum. Estes são usados em tensões superiores a 138 kV.

Para aproximar ao máximo das condições reais de um SEP, além de permitir uma representação mais fidedigna das informações obtidas em campo (BARBOSA, 2010), um sistema completo de medição foi simulado para G_1^R , foco do estudo.

Para tanto, foram simulados TPs ligados aos terminais de G_1^R medindo a tensão das três fases e a tensão no neutro, sendo que todas as medidas são em relação ao terra.

A Figura 9 mostra o modelo de um transformador potencial simulado no RTDS, no qual R_{pri} , L_{pri} e N_1 representam a resistência, indutância e número de espiras do primário, R_{sec} , L_{sec} e N_2 indicam a resistência, indutância e número de espiras do secundário. A carga conectada ao secundário é modelada por R_{carga} , L_{carga} e RP_{carga} (RTDS Technologies, 2006, p. 7.1).

Este modelo calcula a corrente de magnetização de maneira aproximada com base na curva de magnetização, no comprimento do circuito magnético (L_l) e na área transversal do núcleo (S_T). A perda no núcleo é definida pelo parâmetro P_{perda} , como um percentual da corrente de magnetização.

Os parâmetros elétricos do modelo são mostrados na Tabela 12, os dados da curva de magnetização e seu gráfico estão na Tabela 13 e Figura 10, respectivamente.

Figura 9 – Modelo do Transformador de Potencial do RTDS

Tabela 12 – Parâmetros dos Transformadores de Potencial do Sistema RTDS

R_{pri}	L_{pri}	N_1	R_{sec}	L_{sec}	N_2
11,3 Ω	6,0 H	12700	0,55 m Ω	0,29 mH	115

R_{carga}	L_{carga}	RP_{carga}	S_T	L_l	P_{perda}
4,5 Ω	0,53 mH	2298,0 Ω	100 cm ²	0,5 m	50%

Tabela 13 – Curva de Magnetização dos Transformadores de Potencial do Sistema RTDS

B (Wb/m ²)	0,1	0,3	0,5	0,7	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,48
H (A/m)	50	170	300	400	720	900	1100	1500	2000	3000

De acordo com RTDS Technologies (2006, p. 7.15) o TC mais simples e mais usado consiste de um núcleo em forma de anel com o secundário enrolado sobre este. O primário consiste de simples condutor passando através do centro deste anel. O comprimento do circuito magnético (L_l) e sua seção transversal (S_T) são definidos pelas dimensões físicas do anel. Deste modo a relação de transformação é dada por:

$$I_{sec} = \frac{I_{pri}}{N}. \quad (1)$$

Figura 10 – Curva de Magnetização dos Transformadores de Potencial do Sistema RTDS

Na Equação 1, I_{pri} e I_{sec} são as correntes no primário e no secundário, respectivamente; e N é o número de espiras do secundário dado que o primário conta com uma única espira. A Figura 11(a) ilustra a estrutura física deste tipo de TC e a Figura 11(b) mostra o modelo elétrico usado pelo RTDS para simulá-lo. No modelo elétrico tem-se que R_{sec} e L_{sec} são a resistência e a indutância do secundário, respectivamente. A carga conectada ao secundário é modelada por R_{carga} e L_{carga} . A corrente de magnetização e as perdas no núcleo são calculadas da mesma maneira do modelo de TP (RTDS Technologies, 2006, p. 7.15).

Figura 11 – Estrutura Física e Modelo Elétrico dos Transformadores de Corrente do RTDS

A Tabela 14 mostra os parâmetros elétricos do modelo do TC. Os dados da curva de magnetização e seu gráfico estão na Tabela 15 e Figura 12, respectivamente.

O diagrama da Figura 13 mostra a disposição dos TPs e TCs utilizada para monitorar as correntes e tensões de G_1^R . O modelo do GS para faltas internas do RTDS, como já

Tabela 14 – Parâmetros dos Transformadores de Corrente do Sistema RTDS

N	R_{sec}	L_{sec}	R_{carga}	L_{carga}	S_T	L_l	P_{perda}
1500	0,5 Ω	0,8 mH	37,5 Ω	35,0 mH	65 cm ²	0,5 m	50%

Tabela 15 – Curva de Magnetização dos Transformadores de Corrente do Sistema RTDS

B (Wb/m ²)	0,5	1,0	1,2	1,4	1,6	1,65	1,7	1,75	1,76	1,77
H (A/m)	10	25	30	45	100	150	250	400	500	600

Figura 12 – Curva de Magnetização dos Transformadores de Corrente do Sistema RTDS

discutido, proporciona a subdivisão do enrolamento de armadura da fase A. Além disso o modelo fornece a medida de corrente em cada uma das subdivisões (i_{A1} e i_{A2}). Para as demais fases só estão disponíveis as medidas i_{B2} e i_{C2} . Com as medidas i_{A2} , i_{B2} e i_{C2} têm-se as correntes que circulam no enrolamento de armadura a partir do neutro. Somente para a fase A a corrente de armadura que flui através dos terminais, i_{A1} da máquina está diretamente disponível. Deste modo para obter as correntes que fluem no neutro e nos terminais destas fases usou-se as correntes que passam através dos disjuntores, i_{DB} e i_{DC} , que conectam G_1^R ao SEP. Assim, são consideradas faltas internas aquelas que ocorrem a jusante dos disjuntores, região delimitada pelas linhas tracejadas.

A corrente de campo i_{fd} foi medida de maneira direta, sem uso de transdutores. A corrente que circula pelo neutro é indicada por i_N . As medidas de tensão são indicadas por v_A , v_B , v_C e v_N , para as fases A, B e C e para o neutro.

À esquerda da Figura 13 mostram-se os TPs e TCs e indicação de suas grandezas de saída. As quais leem-se, i_x^t e $i_x^n \forall x = a, b, c$ para a representação das correntes que fluem através dos terminais e através do neutro de G_1^R , respectivamente. i_n e v_n denotam a corrente e tensão reduzida do neutro.

Figura 13 – Disposição dos TPs e TCs para o Monitoramento de G_1^R

2.3 Simulação de Faltas

Após a modelagem de todos os componentes do SEP, partiu-se para a simulação de faltas. Foram escolhidos três pontos para aplicar faltas externas, de acordo com a Figura 2, na Barra 1, 6 e 13. Na Barra 13 as faltas foram aplicadas a montante dos disjuntores (Figura 13). As faltas internas foram separadas em dois tipos, faltas aplicadas nos terminais de G_1^R a jusante dos disjuntores e no ponto da divisão do enrolamento da fase A. Neste último o local das faltas fase-terra foi variado entre 5% e 95% com incrementos de 2%. Para os demais pontos foram simuladas faltas fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra, trifásicas e trifásicas envolvendo o terra. A resistência de falta foi de $0,01 \Omega$, valor típico sugerido pelo manual do RTDS, para todos os casos.

Além dos pontos de falta foi considerada a influência do ângulo de inserção da falta, empregando-se os seguintes valores: 0° , 90° , 180° e 270° . Os casos de falta foram repetidos para cada um dos ângulos. Foi considerado como referência de ângulo a tensão na fase A, v_a , que alimenta G_1^R .

O carregamento dos GS tem impacto nas correntes durante o transitório causado pelas faltas. Para investigar essa relação, o carregamento de G_1^R foi ajustado em seis valores distintos. Os carregamentos utilizados estão listados na Tabela 16 e a suas disposições ao longo da curva de capacidade de G_1^R podem ser observadas na Figura 14. Os pontos de carregamento foram escolhidos de modo que as faltas fossem aplicadas enquanto o GS estivesse operando sub-excitado, sobre-excitado e com fator de potência unitário.

O fluxo de potência ativa está relacionado com energia de entrada da fonte motriz, logo

Tabela 16 – Pontos de Operação do Sistema RTDS

Ativa(MW)	215	200	180	100	100	125
Reativa(Mvar)	50	-50	0	125	0	-75

Figura 14 – Pontos de Operação das Simulações de Falta (Sistema RTDS)

relacionado com a velocidade do GS. Por outro lado, o controle da potência reativa está ligado à tensão terminal da máquina (BOLDEA, 2006). Seguindo esse raciocínio, o controle da potência ativa foi feito pelo ajuste da variável P_{ref} do modelo da turbina à gás e regulador de velocidade (Figura 3). Já para o controle da potência reativa usou-se um controlador Proporcional Integral (PI) que monitora a potência reativa fornecida/consumida por G_1^R , medida em Mvar, e modifica a variável V_{ref} , medida em p.u., do sistema de excitação (Figura 6). A constante proporcional do controlador PI foi $K_p = 0,0021$ e a constante integrativa foi $K_i = 0,0021$.

Outro fator que influencia o comportamento das correntes durante eventos de falta, especialmente faltas fase-terra, é a resistência de aterramento. Para observar a influência do aterramento na proteção, a resistência conectada ao neutro de G_1^R , R_n , foi modificada de acordo com a Tabela 17, para cada situação de falta.

Tabela 17 – Resistências de Aterramento Utilizadas no Sistema RTDS

R_n^1	R_n^2	R_n^3	R_n^4	R_n^5	R_n^6	R_n^7	R_n^8	R_n^9
0,04 Ω	0,09 Ω	0,19 Ω	0,38 Ω	0,77 Ω	1,55 Ω	3,10 Ω	12,41 Ω	24,93 Ω

2.4 Oscilografias das Simulações de Falta

Os dados colhidos nas simulações de falta foram utilizados no decorrer do trabalho para auxiliar o desenvolvimento da técnica de proteção inteligente. No entanto, a título de ilustração dos resultados obtidos com as simulações, algumas oscilografias são apresentadas a seguir.

As oscilografias mostram as medidas realizadas conforme indicado na Figura 13. Nas figuras mostradas a seguir podem ser vistas as correntes de entrada e saída de cada uma das fases de G_1^R , a corrente de campo e as tensões das fases.

A Figura 15 mostra as medidas obtidas para o caso de uma falta trifásica na barra 6, aplicada no instante de tempo 0,03 s, com resistência de falta de $0,1 \Omega$ e com ângulo de incidência de 0° . Nesta situação G_1^R estava fornecendo 200 MW e 50 Mvar (capacitivo). A resistência de aterramento era $0,049 \Omega$. A tensão nos terminais de G_1^R se manteve praticamente constante. Observou-se uma pequena redução da corrente nas três fases e um ligeiro decréscimo da corrente de campo.

Figura 15 – Oscilografia de Falta Trifásica na Barra 6 do Sistema RTDS (grandezas medidas nos terminais de G_1^R)

Um caso de falta aplicada no instante de tempo 0,0225 s, com resistência de $0,1 \Omega$, envolvendo as fases A e B e o terra da barra 1 é mostrado na Figura 16. O ângulo de incidência foi de 0° . O GS fornecia 100 MW com fator de potência unitário antes da incidência da falta. O GS estava aterrado através de uma resistência de $0,049 \Omega$. Nesta

oscilografia observa-se uma redução na tensão das três fases e a corrente de todas as fases mais que dobraram. A corrente de campo apresentou um aumento conjuntamente com uma oscilação. O incremento da corrente de campo é resultado da ação dos reguladores de tensão à queda da tensão nos terminais de G_1^R causada pela falta.

Figura 16 – Oscilografia de Falta Fase-Fase-Terra na Barra 1 do Sistema RTDS (grandezas medidas nos terminais de G_1^R)

A oscilografia de uma falta aplicada no instante de tempo 0,0325 s, com resistência de $0,1 \Omega$, na barra 13, na qual uma situação envolvendo a fase B e terra com ângulo de incidência de 180° , é mostrada Figura 17. Nesta situação G_1^R estava fornecendo 100 MW com fator de potência unitário. O aterramento do GS estava configurado com uma resistência de $1,562 \Omega$. A tensão das fases A e C praticamente dobram assim como a corrente da fase B. Observa-se a circulação de corrente no neutro da mesma magnitude da corrente da fase B, como era esperado dado o local e tipo da falta. A corrente de campo apresentou uma ligeira oscilação sobreposta ao seu valor original.

Um caso de falta interna ao GS do sistema RTDS é mostrado na Figura 18. A falta foi aplicada no instante de tempo 0,05 s. O GS fornecia 180 MW com fator de potência unitário no momento da incidência da falta. A falta do tipo fase-terra foi aplicada a 51% da fase A com ângulo de incidência de 270° . O GS estava aterrado através de um resistência de $0,098 \Omega$. A tensão da fase C apresentou um aumento e a tensão da fase A um decréscimo. As correntes que circulam pelos terminais apresentam uma ligeira redução acompanhada da mudança dos ângulos entre as fases. Já nas correntes que fluem do neutro

Figura 17 – Oscilografia de Falta Fase-Terra na Barra 13 do Sistema RTDS (grandezas medidas nos terminais de G_1^R)

observa-se o aumento de seis vezes da corrente da fase A. A corrente do neutro acompanha a corrente da fase A durante a falta. A corrente de campo apresenta uma oscilação com frequência de 120 Hz. A falta aplicada alterou a simetria elétrica dos enrolamento de armadura e causou a circulação de altas correntes na fase A. A assimetria em combinação com a alta corrente na fase A resulta em um campo magnético desequilibrado que contém o componente de segundo harmônico que é induzido no circuito de campo.

Este capítulo apresentou a simulação de SEP composto por diversas máquinas geradoras, linhas de transmissão e cargas. Os controladores de tensão e frequência foram adotados para aproximar a simulação deste SEP a um sistema real. O SEP simulado proporcionou a coleta extensiva de dados de faltas aplicadas em diversos pontos do sistema. O modelo de GS que possibilita a inserção de faltas internas foi empregado para simular faltas internas à G_1^R . As oscilografias coletadas foram analisadas, das quais algumas foram apresentadas no final deste capítulo. A análise das oscilografias mostrou que o comportamento dos sinais elétricos monitorados de G_1^R são coerentes com o comportamento esperado do GS para as situações de faltas consideradas. Ressalta-se que o conjunto de oscilografias obtidas por meio deste SEP aliadas às oscilografias coletadas nos ensaios em GSs reais (Capítulo 3) foi vital para o desenvolvimento e validação do método de proteção proposto.

Figura 18 – Oscilografia de Falta Fase-Terra Interna em G_1^R do Sistema RTDS (grandezas medidas nos terminais de G_1^R)

Ensaaios de Faltas Internas em Geradores Síncronos

A avaliação de desempenho das atuais técnicas de proteção de GSs e a proposição de novos algoritmos requerem um conjunto de dados sobre o comportamento do GS em condição normal de operação e em situações de faltas interna e externa. O uso de *softwares* de simulação de transitórios eletromagnéticos, como o *Alternative Transients Program* (ATP) (ATP, 1987), é amplamente utilizado para este fim. No entanto, diferentemente dos transformadores, linhas de transmissão e outros componentes do SEP, nenhum *software* de simulação possui um modelo de máquina síncrona que contemple de maneira completa a simulação de faltas internas.

Entre os *softwares* comerciais de simulação somente o RTDS (KUFFEL et al., 1995) possibilita a simulação de faltas internas, como mostrado no capítulo anterior, porém de maneira limitada. O modelo disponível no RTDS possibilita somente faltas do tipo fase-terra em GS com um caminho por fase. Neste trabalho, definiu-se caminho como um conjunto de bobinas conectadas em série. O enrolamento completo de uma fase pode ser composto por um grupo de caminhos conectados em paralelo. Este modelo considera o enrolamento senoidalmente distribuído o que negligencia os harmônicos naturalmente produzidos pelo GS. Muitas técnicas de proteção usam a informação sobre os harmônicos para detecção de situações de falta (STEIN; LINDERS, 1977; PENMAN; JIANG, 1996; GUOPEI et al., 2000).

Para fornecer dados reais para complementar a avaliação do desempenho das técnicas tradicionais e subsidiar o desenvolvimento de novas técnicas de proteção inteligente de GSs, optou-se por um conjunto de ensaios em GSs reais. Nos ensaios realizados foram inseridos diversos tipos de faltas em distintos pontos de operação dos GSs. Com esse amplo conjunto de dados foi possível realizar testes mais aprofundados no desempenho das técnicas tradicionais e auxiliar o desenvolvimento das técnicas de proteção inteligentes.

Os ensaios de faltas em GSs foram realizados em dois sistemas distintos. Um desenvolvido na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo e o

outro desenvolvido na *Schulich School of Engineering* (SSE), *University of Calgary* em programa de doutorado sanduíche. Os ensaios nas dependências da SSE foram possíveis graças à concessão de bolsa de estágio no exterior pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo período de seis meses.

Este capítulo tem como objetivo mostrar todas as etapas realizadas para a execução dos ensaios de faltas internas. Inicialmente uma revisão bibliográfica apresenta alguns trabalhos nos quais foram empregados ensaios em máquinas síncronas reais. Esta revisão tem como objetivo mostrar os arranjos utilizados para realizar os experimentos e suas motivação. Em seguida, são mostrados os critérios de projeto e posterior confecção dos enrolamentos de armadura que possibilitassem a inserção de faltas internas. Além disso mostra o desenvolvimento e montagem de um conjunto de placas para realização do condicionamento dos sinais de tensão e corrente para a posterior aquisição. Ainda relacionado com os ensaios de faltas é discutida a necessidade da implantação de controles automáticos das condições de pré-faltas dos GSs em ensaio. Os resultados da ação dos controles dos ensaios e algumas oscilografias das formas de ondas de falta podem ser observados ao fim deste capítulo.

3.1 Revisão Bibliográfica

Encontram-se na literatura técnica alguns trabalhos nos quais os autores lançam mão de ensaios reais de faltas internas em GSs. Esta revisão bibliográfica traz os artigos mais relevantes e recentes que tratam sobre este assunto.

Os motivos para esses ensaios são diversos, tais como a avaliação de modelos de simulação numérica do funcionamento de GSs, técnicas de proteção para identificação de faltas nos enrolamentos de GSs e algoritmos de monitoramento das condições dos enrolamentos de máquinas síncronas.

Megahed e Malik (1998) propõem um método para simular faltas internas em GSs, cujos enrolamentos do estator possuem um único caminho por fase, utilizando a representação direta de fase. Para validar o modelo desenvolvido, foram feitos ensaios com um GS, acionado por um Motor de Corrente Contínua (MCC), conectado ao sistema elétrico local. Foram realizadas faltas do tipo fase-terra e fase-fase, apenas no ponto central (50%) dos enrolamentos de armadura. Com objetivo de reduzir a corrente de falta foram adicionadas resistências entre o gerador e sistema elétrico. Os autores também discutem o efeito da saturação magnética dos geradores nas simulações numéricas destes. Os resultados obtidos das simulações e dos ensaios foram comparados e comprovaram o bom desempenho do modelo proposto.

Cruz e Cardoso (2001) mostram a utilização do vetor estendido de Park para detectar faltas nos enrolamentos de motores de indução e síncronos. O foco do trabalho é detectar faltas entre espiras pois, de acordo com os autores, os outros tipos de faltas evoluem a

partir deste. A identificação da falta utiliza a amplitude da segunda harmônica do vetor estendido de Park, que é maior conforme a extensão da falta. Os enrolamentos do estator de um motor de indução e de um motor síncrono foram modificados para inserção de faltas entre espiras. A assinatura dos sinais obtidos durante os ensaios realizados nos dois motores foram semelhantes, indicando que esse método pode ser aplicado para detecção de faltas entre-espiras tanto em motores de indução como em motores síncronos.

O trabalho de Nengling e Chen (2006) apresenta uma nova proteção diferencial de fase dividida para um gerador de grande porte baseada na Transformada *Wavelet* (TW). Os resultados mostram que em condições normais quase não existem componentes harmônicos na corrente. No entanto, em condições de faltas internas são produzidos componentes de alta frequência, os quais podem ser utilizados para detectar faltas internas em geradores. Os autores descrevem a implementação da técnica proposta, incluindo os projetos de *hardware* e *software*. Para avaliar a eficácia da técnica, utilizou-se simulação numérica que possibilita faltas internas em GSs e complementarmente um gerador real de 125 MW foi submetido a diversas condições de faltas. Os testes realizados indicaram que o método utilizado foi efetivo em seu propósito. No entanto, destacam-se duas limitações à aplicação do método desenvolvido. A primeira é a alta taxa de amostragem empregada (12kHz) pois os autores não discutem a resposta em frequência dos transformadores de instrumento utilizados para reduzir a magnitude dos sinais medidos. A segunda limitação é a necessidade de medir a corrente em cada caminho ou grupo de caminhos que requer maior número de TCs.

Tu et al. (2006) descrevem um modelo para máquinas síncronas que inclui faltas internas. O modelo proposto usa a função de distribuição dos enrolamentos para representar as harmônicas espaciais. Os autores mostram como derivar a função de distribuição dos enrolamentos e apresentam um exemplo de uma máquina real. Também é destacada a modificação do modelo para simular faltas internas. A máquina utilizada no exemplo foi ligada à uma carga trifásica resistiva e o neutro do gerador foi aterrado através de uma resistência para limitar a corrente de falta. Posteriormente, a máquina foi submetida a uma falta fase-terra na porção central do enrolamento da fase A. Assim, os dados de regime permanente e de falta foram utilizados para validar o modelo proposto. Observa-se que os resultados foram satisfatórios, embora a proposta não considere a histerese e saturação magnéticas.

Algumas turbinas eólicas de grande porte utilizam geradores síncronos de baixa velocidade conectados diretamente à turbina, e por meio de um conversor de potência enviam energia para o sistema elétrico. O monitoramento e diagnóstico das condições elétricas e mecânicas destas máquinas devem levar em consideração os efeitos aerodinâmicos do vento, devido à característica estocástica deste. A mudança do regime dos ventos dificulta o uso de técnicas baseadas na análise espectral. Deste modo, Yang, Tavner e Wilkinson (2009) investigaram o uso da Transformada *Wavelet* (TW) para o monitoramento de fa-

lhas no gerador e nos componentes mecânicos a ele conectados. O algoritmo proposto foi validado experimentalmente por um conjunto de teste composto por um gerador síncrono trifásico de baixa velocidade com rotor a ímãs permanentes, movido por um motor de corrente contínua controlado por um modelo que representa as forças aerodinâmicas de uma turbina eólica. Foram executados diversos ensaios de defeitos nos enrolamentos do gerador e nas partes mecânicas. Os autores realizaram uma intensa análise dos sinais obtidos e um desdobramento interessante foi a identificação de falhas mecânicas com uso exclusivo de sinais medidos do gerador. O estudo indicou a potencialidade do uso da TW para detectar falhas elétricas e mecânicas em turbinas eólicas.

3.2 Sistema de Ensaio de Falhas da Escola de Engenharia de São Carlos

O sistema de ensaio de falhas da EESC foi inteiramente desenvolvido neste trabalho de doutorado para a coleta extensiva de dados de falhas em GSs. Utilizou-se um GS que teve o enrolamento de armadura modificado para possibilitar diversos tipos de falhas internas. Isso faz esse sistema único, pois não se observou na literatura um sistema que possibilite ensaios tão diversos.

Para a realização dos ensaios foi utilizado um conjunto de máquinas elétricas formado por:

- G_1^E : Um GS, objeto do ensaio;
- M_1^E : Um MCC, fonte motriz de G_1^E .

A Figura 19 sintetiza as conexões elétricas e mecânicas das máquinas elétricas utilizadas nos ensaios e a Figura 20 mostra uma foto da montagem das máquinas. Na Figura 19 V_S e X_S representam o equivalente da rede elétrica da EESC, LT é o equivalente de linha transmissão, C_1 mostra o contator que conecta G_1^E à LT, C_2 é a representação do contator que insere a condição de falta. Os laços de controle de potência ativa e reativa são evidenciados assim como os *choppers* utilizados para atuar sobre os campos das máquinas. Cada componente apresentado na figura é descrito em detalhes nas seções subsequentes.

3.2.1 Gerador Síncrono

G_1^E possui quatro polos salientes, tensão terminal de 220 V e potência de 2 kVA. O enrolamento de armadura é composto por dois caminhos por fase. Os parâmetros elétricos completos estão disponíveis na Tabela 18, na qual além dos parâmetros já apresentados na seção 2.2.1 tem-se: τ_{do} constante de tempo em vazio de eixo direto, τ'_d constante de tempo transitória de eixo direto, τ''_d constante de tempo sub-transitória de eixo direto, X_0 reatância de sequência zero, R_0 resistência de sequência zero, X_2 reatância de sequência

Figura 19 – Conexões das Máquinas Elétricas para os Ensaios

Figura 20 – Foto da Montagem das Máquinas

negativa, R_2 resistência de sequência negativa, R_{fd} resistência de campo, e τ_a constante de curto-circuito.

Tabela 18 – Características Elétricas da Máquina Síncrona G_1^E

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
X_d	1,463 p.u.	X'_d	0,163 p.u.	X''_d	0,108 p.u.
X_q	0,778 p.u.	X''_q	0,092 p.u.	τ_{do}	0,1669 s
τ'_d	0,0186 s	τ''_d	0,0058 s	X_0	0,166 p.u.
R_0	0,106 p.u.	X_2	0,166 p.u.	R_2	0,106 p.u.
R_{fd}	242,26 Ω	R_a	1,5 Ω	τ_a	0,00778 s

A armadura de G_1^E foi fechada em duplo estrela proporcionando a tensão nominal de fase de 127 V eficazes em seus terminais. O eixo de G_1^E foi acoplado ao eixo de M_1^E . O enrolamento de campo de G_1^E foi alimentado e controlado por meio do *Chopper* CHP_1^E da Unidade de Controle das Máquinas (UCM) (Seção 3.2.4.4), tendo como objetivo controlar a potência reativa fornecida/consumida por G_1^E .

3.2.1.1 Modificação do Enrolamento da Armadura do GS

Para realizar faltas internas nos enrolamentos da armadura do GS foram inseridas 24 derivações em diversas posições dos enrolamentos. As posições das derivações foram de-

finidas buscando maximizar a quantidade de ensaios de falhas possíveis com um pequeno número de derivações. Para tanto, estudou-se as simetrias elétrica e espacial dos enrolamentos e com isso eliminou-se os casos de falhas entre enrolamentos distantes fisicamente, que têm baixa probabilidade de ocorrer. Portanto, foram consideradas somente as falhas do tipo fase-fase e entre caminhos nas quais as bobinas compartilham a mesma ranhura do estator. Com as posições escolhidas também foi maximizado o número de falhas do tipo fase-terra e entre-espiras. As etapas de montagem dos enrolamentos com as derivações para inserção de falta, realizada pela empresa Equacional Elétrica & Mecânica Ltda, são mostradas na Figura 95 do Apêndice A.

Como a condição de falta é uma situação de funcionamento atípica para o GS são necessários cuidados especiais para que os ensaios de falta não danifiquem o equipamento. Uma maneira de diminuir a possibilidade de danos é limitar a duração da situação faltosa. No entanto, como o controle do ensaio é realizado pelo computador, caso este falhe, a falta poderá perdurar por mais tempo que o recomendado. Assim, para garantir a proteção do enrolamento caso haja falha no controle feito via computador, optou-se por monitorar continuamente a temperatura dos enrolamentos e caso se detecte o aumento excessivo de temperatura o ensaio é interrompido, sem a intervenção do computador. Para tanto, foram instalados 12 sensores de temperatura do tipo *Positive Temperature Coefficient* (PTC) ao longo do enrolamento da armadura. As saídas dos sensores foram ligadas à Unidade de Controle de Falhas (UCF) que será discutida na Seção 3.2.4.3.

A Figura 21 mostra uma representação simplificada dos enrolamentos da armadura e suas respectivas derivações. Nesta, os terminais originais da máquina são designados pela letra T, as derivações inseridas para a inserção de falhas internas são indicadas pela letra D e a letra S indica os terminais de acesso aos sensores PTC dispostos ao longo do estator. As indicações das derivações são acompanhadas da posição percentual no enrolamento a contar do neutro. O estator de G_1^E tem 48 ranhuras que acomodam um enrolamento distribuído de dupla camada. O enrolamento de armadura é composto por doze grupos de quatro bobinas. As bobinas tem passo pleno e são constituídas por vinte sete espiras de fio 19 AWG. Dois grupos em série, deslocados 180° elétricos, compõem um circuito de uma fase e também um polo. Cada fase tem dois circuitos conectados em paralelo. Os detalhes técnicos podem ser encontrados na Figura 96, apresentada no Apêndice A, que mostra o desenho do enrolamento planejado.

3.2.2 Motor de Corrente Contínua

M_1^E exerce a função de fonte motriz de G_1^E . Esta máquina tem potência de 1,7 kW, velocidade nominal de 1800 rpm e tensão de armadura de 250 Vdc, corrente máxima de armadura de 9 A e corrente máxima de campo de 600 mA. As principais características desta máquina estão disponíveis na Tabela 19. Na qual V_{fd} é a tensão de campo, R_{fd} é a resistência de campo, R_a é a resistência de armadura, L_a é indutância de armadura, K é

Figura 21 – Posição das Derivações nos Enrolamentos da Armadura do Gerador Síncrono

a constante de proporcionalidade, B é o coeficiente de atrito viscoso e J é o momento de inércia. M_1^E foi ligado na configuração excitação independente, na qual sua armadura foi alimentada por uma fonte de Corrente Contínua (CC) de 220 V e o campo foi controlado pelo *Chopper* CHP_2^E da UCM, buscando controlar a potência ativa fornecida por G_1^E .

Tabela 19 – Características Elétricas da Máquina de Corrente Contínua M_1^E

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
V_{fd}	170 V	R_{fd}	327,12 Ω
L_{fd}	81,78 H	R_a	1,95 Ω
L_a	33,75 mH	V_a	220 V
K	2,736	B	7,6E-3 kgm/rad/s
J	0,0931 Nms ²		

3.2.3 Linha de Transmissão

G_1^E é conectado ao sistema elétrico da universidade através de uma resistência e indutância em série, para simular o efeito de uma linha de transmissão. Uma das funções deste equivalente de linha é limitar a contribuição de corrente da rede elétrica da universidade para a corrente de falta. Outra função é aproximar o sistema de ensaio à condição real em que os GSs estão conectados ao SEP. A Tabela 20 mostra os valores da resistência e indutância do equivalente de linha. Os valores dos componentes do equivalente de linha foram calculados de modo que, para uma tensão de 220 V e potência de 2 kVA, os parâmetros da linha se aproximem, em p.u., de uma linha de transmissão real de 138 kV, circuito duplo, de 40 MVA com aproximadamente 130 km. A Tabela 21 mostra os valores de resistência e indutância por quilometro desta linha hipotética.

Tabela 20 – Parâmetros do Equivalente de Linha

Resistência	Indutância
0,81 Ω	5,2 mH

Tabela 21 – Parâmetros da Linha de Transmissão de 138kV

Resistência	Indutância
8,5 m Ω /km	490 μ H/km

3.2.4 Sistema de Medição e Controle do Ensaio

As medidas de interesse e o controle do ensaio foram realizadas por meio de um computador, uma Placa de Aquisição de Dados (PAD), uma caixa de condicionamento de sinais e uma caixa de interface para execução de faltas.

3.2.4.1 Computador e Placa de Aquisição de Dados

A PAD faz a digitalização através da amostragem e quantização dos sinais elétricos. Os sinais já digitalizados podem ser processados pelo computador. O computador os utiliza para controlar o ensaio e armazenar em arquivo as medições de interesse. A placa de aquisição utilizada (Figura 22) possui 32 canais de entrada analógica de 16 bits, 32 canais de entrada/saída digitais e 4 canais de saída analógicos de 16 bits, sendo capaz de operar com taxa de amostragem máxima de 250 kHz. O computador utilizado tem como componentes principais um processador *Intel Pentium IV* de 32 bits com velocidade de 2,4 GHz e 1 GB de memória RAM. O Sistema Operacional (SO) instalado foi o Linux Debian versão Lenny com Kernel(2.6.32)(DEBIAN..., 2012) modificado com uso do RTAI versão 3.7 (MANTEGAZZA; DOZIO; PAPACHARALAMBOUS, 2000) para possibilitar a execução dos processos de controle em tempo real.

Figura 22 – Foto da Placa de Aquisição de Dados Utilizada

3.2.4.2 Unidade de Condicionamento de Sinais

É necessário adequar os sinais de entrada para níveis elétricos compatíveis com a PAD. Para tanto foi desenvolvida por Souza (2012) uma Placa de Circuito Impresso (PCI) para o condicionamento das correntes de entrada e outra para as tensões de entrada.

A PCI responsável pelo condicionamento de tensão foi projetada para receber sinais de tensão de até 270 V eficazes e fornecer em sua saída uma tensão de $\pm 10 V_p$, mais apropriada para a PAD. Para tanto, foram empregados divisores resistivos para rebaixar a tensão do sinal de entrada e um amplificador isolador de barreira capacitiva para realizar a isolamento elétrica entre a PAD e o sistema em ensaio. Esta topologia possibilita a medição de sinais de CC e Corrente Alternada (CA) com frequência de até 5,0 kHz, limitada pela resposta do amplificador isolador.

Após a etapa de isolamento e rebaixamento dos sinais de tensão, um amplificador operacional realiza o ajuste de ganho e *offset*. E por fim o sinal é submetido a um filtro ativo *Anti-Aliasing* do tipo *Butterworth* de segunda ordem com frequência de corte de 2,0 kHz.

A Figura 23 mostra as etapas da placa de condicionamento de tensão.

Figura 23 – Circuito de Condicionamento de Tensão

O condicionamento do sinal de corrente é realizado por uma PCI que converte a

corrente de entrada em tensão em sua saída, visto que as PADs funcionam, em sua maioria, apenas com tensão. Foram desenvolvidas duas topologias de circuitos para adequar as medidas de corrente às entradas da placa de aquisição. A primeira topologia foi empregada na medição das correntes de armadura e de falta que durante situações de falta podem assumir valores de até 90 A e a segunda topologia foi usada na medição das correntes de campo que têm valor máximo de operação de 600 mA.

A primeira PCI foi projetada para receber sinais de corrente de até 90 A_p e fornecer em sua saída uma tensão de $\pm 10 V_p$. Para tanto, sensores de efeito *Hall* foram utilizados para realizar a conversão do sinal de corrente em tensão ao mesmo tempo que isolam eletricamente o circuito de condicionamento do sistema em ensaio.

Na segunda topologia, um resistor em derivação de baixo valor ôhmico foi utilizado para medição de corrente. A queda de tensão sobre o resistor indica a corrente que circula pelo circuito em medição. Um amplificador isolado por barreira capacitiva realiza a isolamento entre o sistema em ensaio e a PAD. Este circuito foi projetado para medir sinais de corrente de até 1 A_p eficaz e proporcionar uma saída de $\pm 10 V_p$.

Ambas as topologias podem medir sinais de CC e CA de até 3,0 kHz, limitadas pela resposta em frequência dos Circuitos Integrados (CIs) utilizados. Igualmente como no circuito de condicionamento de tensão, um amplificador operacional realiza o ajuste de ganho e *offset* e um filtro ativo, com frequência de corte de 2,0 kHz, é utilizado de modo a evitar o efeito *Aliasing*. A Figura 24 mostra as etapas do circuito de condicionamento de corrente.

Para possibilitar todas as medidas necessárias ao ensaio foram confeccionados:

- 8 Circuitos de condicionamento de corrente que utilizam sensores *Hall*;
- 2 Circuitos de condicionamento de corrente que utilizam resistores *Shunt*;
- 8 Circuitos de condicionamento de tensão que utilizam amplificadores isoladores.

A Figura 25 mostra uma foto da Unidade de Condicionamento de Sinais (UCS) desenvolvida. Um cabo de múltiplas vias faz a conexão entre a UCS e a PAD.

3.2.4.3 Unidade de Controle de Falhas

Para realizar as faltas no GS de maneira controlada e segura foi desenvolvida uma Unidade de Controle de Falhas (UCF). A UCF faz a interface entre o computador e o sistema de ensaio, possibilitando que um algoritmo de controle possa acionar as máquinas e inserir faltas no GS em um dado instante de tempo e com duração determinada. A UCF possui seis relés de contato seco que recebem, através das saídas digitais da PAD, sinais que determinam seu fechamento e abertura. As saídas digitais PAD foram isoladas eletricamente através de isoladores ópticos.

Figura 24 – Circuito de Condicionamento de Corrente

Figura 25 – Unidade de Condicionamento de Sinais

Como medida de segurança, um circuito monitora constantemente a temperatura dos enrolamentos do estator do GS através das sondas PTC e inibe o acionamento dos relés caso a temperatura esteja acima do valor nominal. Esse controle independe da ação do computador, ou seja, atua diretamente no acionamento do relé. A Figura 26 mostra os blocos funcionais da UCF.

Para facilitar e agilizar a execução dos ensaios, as derivações dos enrolamentos do estator do GS e os contatos dos relés foram ligados aos bornes montados na UCF. Desta maneira, através de cabos com pinos bananas pode-se configurar facilmente o tipo de falta a ser realizada. Destaca-se que foram utilizados cabos de $2,5 \text{ mm}^2$ para fazer a conexão entre as derivações do GS e a UCF. Como a seção dos cabos é muito maior que a seção do fio usado nos enrolamentos, a influência destes sobre as medições pode ser desprezada.

Figura 26 – Blocos Funcionais da Unidade de Controle de Falhas

A Figura 27 mostra a UCF projetada. Um cabo de múltiplas vias faz a conexão, através de um conector DB-15, entre a UCF e a PAD.

Figura 27 – Unidade de Controle de Falhas

3.2.4.4 Unidade de Controle das Máquinas

Os ensaios, como mencionado anteriormente, foram utilizados um MCC e um GS. Cada um exerce um papel específico, fonte motriz e gerador. Logo, para realizar o controle das condições de pré-falta é necessário controlar o funcionamento de todas as máquinas. Para isso foi confeccionada a Unidade de Controle das Máquinas (UCM), que é composta por quatro conversores CC-CC (*Choppers*) do tipo *Buck* (SHEPHERD; ZHANG, 2004), que operam em um único quadrante. Um CI dedicado gera o sinal de *Pulse Width Modulation* (PWM) com frequência de 2,0 kHz, suficiente para garantir o regime de condução contínua da corrente de acionamento das máquinas, que comanda as chaves estáticas. O ciclo de trabalho do sinal de PWM é controlado por uma tensão de entrada de 10 V_p, proveniente de uma saída analógica da PAD. O sinal de PWM é transmitido à chave estática por meio

de um acoplador óptico de alta velocidade, isolando eletricamente a PAD do circuito de alta potência. Os blocos funcionais da UCM são mostrados na Figura 28 e a Figura 29 mostra a foto do conjunto montado.

Figura 28 – Blocos Funcionais da Unidade de Controle das Máquinas

Figura 29 – Unidade de Controle das Máquinas

A máquina de corrente contínua M_1^E foi controlada pela técnica de enfraquecimento de campo. Um *chopper* da UCM foi utilizado para controlar a tensão aplicada no enrolamento de campo de M_1^E . Ao controlar a corrente de campo pode-se ajustar a potência ativa injetada por G_1^E na rede através do controle do torque aplicado ao seu eixo.

Outro *chopper* da UCM foi usado para ajustar a tensão aplicada no campo de G_1^E . A potência reativa fornecida/consumida por G_1^E está relacionada com a tensão aplicada ao campo desta máquina. Os demais *choppers* não foram utilizados.

3.2.5 Pontos de Falta

Foram executados ensaios de falta do tipo fase-terra, fase-fase, entre espiras e entre caminhos. Cada um dos tipos de falta é discutido em detalhes nesta seção. A Figura 30 mostra as ligações elétricas de cada tipo de falta considerado, na qual estão indicadas todas

medidas de corrente e tensão realizadas. A designação de cada medida está disponível na Tabela 37. Nos ensaios realizados foram consideradas somente faltas francas ($Z_f = 0$).

As faltas trifásicas não foram contempladas, pois foram considerados somente casos de faltas entre bobinas fisicamente próximas no estator, e não se observa proximidade entre bobinas de três fases simultaneamente. Isso mostra que esse tipo de falta é na verdade a evolução de uma condição de falta anterior. Seguindo a mesma linha de raciocínio as faltas fase-fase-terra também foram ignoradas.

Figura 30 – Tipos de Falhas

As faltas fase-terra envolvem uma derivação e o ponto de aterramento e ocorrem quando há falha na isolação de determinado ponto da bobina, provocando o contato elétrico com a massa do gerador. A Tabela 22 mostra todos os ensaios de falta fase-terra possíveis. A primeira coluna indica qual derivação foi conectada ao terra e a segunda coluna mostra a localização desta derivação no enrolamento de armadura, conforme mostra a Figura 21.

Falha de isolação em bobinas de fases distintas que colocam estas em contato elétrico direto constituem faltas do tipo fase-fase. Neste trabalho foram consideradas somente situações de faltas desta natureza nas quais as bobinas compartilham a mesma ranhura

Tabela 22 – Lista das Faltas Fase-Terra

Derivação	Localização	Conexão	Derivação	Localização	Conexão
D01	A2 (0,5%)	Terra	D13	A2 (50,0%)	Terra
D02	B2 (5,0%)	Terra	D14	B2 (55,0%)	Terra
D03	B2 (10,0%)	Terra	D15	B2 (60,0%)	Terra
D04	A2 (13,0%)	Terra	D16	A2 (62,5%)	Terra
D05	C1 (17,5%)	Terra	D17	C1 (67,5%)	Terra
D06	A1 (22,5%)	Terra	D18	A1 (72,5%)	Terra
D07	A1 (25,5%)	Terra	D19	A1 (75,0%)	Terra
D08	C1 (30,0%)	Terra	D20	C1 (80,0%)	Terra
D09	A2 (35,0%)	Terra	D21	A2 (85,0%)	Terra
D10	A2 (38,0%)	Terra	D22	A2 (87,5%)	Terra
D11	A1 (42,5%)	Terra	D23	A1 (92,5%)	Terra
D12	A1 (47,5%)	Terra	D24	A1 (97,5%)	Terra

do estator. A avaliação da vizinhança entre bobinas de fases distintas foi feita pela consulta do enrolamento apresentado no Apêndice A (Figura 96). A Tabela 23 mostra os ensaios feitos, destacando as fases envolvidas.

Falta entre caminhos é aquela em que ocorre conexão elétrica entre duas bobinas de caminhos diferentes de uma mesma fase. Assim como no caso das faltas fase-fase, foram consideradas somente situações de faltas desta natureza nas quais as bobinas compartilham a mesma ranhura do estator. Todos os ensaios realizados para esse tipo de falta são mostrados na Tabela 24.

Tabela 23 – Lista das Faltas Fase-Fase

Derivações				Fase			
Derivações	Fase	Derivações	Fase	Derivações	Fase	Derivações	Fase
D23	D05	A	C	D21	D14	A	B
D24	D08	A	C	D22	D15	A	B
D23	D08	A	C	D21	D15	A	B
D24	D05	A	C	D22	D14	A	B
D11	D17	A	C	D09	D02	A	B
D12	D20	A	C	D10	D03	A	B
D11	D20	A	C	D09	D03	A	B
D12	D17	A	C	D10	D02	A	B

Tabela 24 – Lista das Faltas entre Caminhos

Derivações				Derivações			
Derivações	Fase	Derivações	Fase	Derivações	Fase	Derivações	Fase
D23	D09	D11	D21	D23	D10	D11	D22
D18	D13	D06	D01	D18	D16	D06	D04
D24	D10	D12	D22	D24	D09	D12	D21
D19	D16	D07	D04	D19	D13	D07	D01
D23	D10	D11	D22				
D18	D16	D06	D04				
D24	D09	D12	D21				
D19	D13	D07	D01				

Curtos-circuitos entre espiras são observados quando falhas de isolamento ocorrem em partes distintas de uma mesma bobina. A Tabela 25 mostra os ensaios conduzidos frente a todos os possíveis, sendo que a terceira coluna indica a percentagem do enrolamento curto-circuitado. Como cada caminho é composto por oito bobinas, cada bobina representa 12,5% do enrolamento. Por exemplo no caso de falta entre D01 e D04 quase a totalidade da bobina foi envolvida pela falta. As duas primeiras colunas indicam os pontos que foram eletricamente conectados, através do contator de falta, configurando o caso de falta.

As faltas externas ao GS foram aplicadas nos terminais deste e no começo da linha de transmissão.

Tabela 25 – Lista das Falhas Entre-Espiras

Derivações		(%)	Derivações		(%)
D01	D04	12,0	D09	D10	2,8
D02	D03	7,4	D18	D19	7,4
D23	D24	2,8	D17	D20	12,4
D06	D07	7,4	D13	D16	11,6
D05	D08	12,1	D14	D15	7,4
D21	D22	2,8	D11	D12	2,7

3.3 Sistema de Ensaio de Falhas da *Schulich School of Engineering*

Na *Schulich School of Engineering* (SSE), *University of Calgary*, está disponível um conjunto de máquinas elétricas, linha de transmissão e equipamentos de controle que tornam possível a simulação, em escala reduzida, de um SEP. A Figura 31 sintetiza as conexões elétricas e mecânicas das máquinas elétricas utilizadas nos ensaios. Uma máquina de corrente contínua funciona como fonte motriz de um GS. A armadura do gerador é conectada, por meio de um contator, a uma linha de transmissão que está conectada, através de outro contator, a rede da universidade. Através de um painel de comando controla-se as máquinas elétricas e a linha de transmissão. A Figura 32 mostra fotos do conjunto de máquinas elétricas e da linha de transmissão. Esta seção descreve os principais equipamentos utilizados nos experimentos.

Figura 31 – Conexões das Máquinas Elétricas para os Ensaios

3.3.1 Gerador Síncrono

O GS, nomeado G_1^S , disponível no laboratório tem potência de 3 kVA, 4 polos lisos, tensão terminal de 220 V e corrente nominal de 7,9 A. O enrolamento de armadura deste gerador possui um caminho por fase composto por 4 bobinas em série. Máquinas síncronas de pequeno porte, como G_1^S , têm a constante de tempo transitória em vazio de eixo direto,

Figura 32 – Fotos do Sistema SSE

τ'_{do} , bem inferior ao valor encontrado em máquinas síncronas de grande porte empregadas nos sistemas de geração dos SEPs. Para aproximar o comportamento dinâmico de G_1^S a um GS de grande porte um sistema chamado Regulador de Constante de Tempo (RCT) foi projetado por Runtz et al. (1973) para aumentar eletronicamente o valor de τ'_{do} . O Apêndice B mostra os detalhes técnicos deste dispositivo. Para os ensaios de faltas neste GS foram ajustadas duas τ'_{do} distintas 4,5 s e 2,6 s, representando duas máquinas de tamanhos diferentes. A Tabela 26 mostra as características elétricas desta máquina.

Tabela 26 – Características Elétricas do Gerador Síncrono da SSE

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
X_d	2,17 p.u.	X'_d	0,375 p.u.	X''_d	0,233 p.u.
X_q	2,17 p.u.	X_l	0,128 p.u.	τ'_{do}	0,765 s †
τ'_d	0,131 s	τ''_d	0,047 s		

† Sem o Regulador de Constante de Tempo.

3.3.2 Motor de Corrente Contínua

O MCC, M_1^S , utilizado como fonte motriz do GS opera a 1800 rpm, 220 V, tem 7,5 HP ($\simeq 5,6 \text{ kW}$), corrente de armadura máxima de 30 A e corrente máxima de campo de 4 A. Os enrolamentos do motor estão configurados no modo de excitação independente. A armadura é alimentada por uma fonte de 220 V_{dc} e o campo através de um *chopper* de 1 quadrante que está ligado a uma fonte de 40 V_{dc} .

3.3.3 Linha de Transmissão

Uma linha de transmissão de 500 kV, 100 MVA, circuito duplo, com extensão de 300 km foi simulada por um equivalente composto por indutores, resistores e capacitores. Os resistores e indutores foram conectados em série e representam o cabo da linha e os capacitores foram conectados entre o cabo e o terra, representando a capacitância parasita da linha. Os valores dos componentes do equivalente de linha foram calculados de modo que, para uma tensão de 208 V e potência de 3 kVA, os parâmetros da linha se aproximem, em p.u., de uma linha real de 500kV. O equivalente de linha foi separado em 12 seções π , equivalente a 50 km cada, compostos de um resistor e um indutor em série e dois capacitores ligando o extremo de cada seção ao terra. Estas seções seguem a mesma teoria que aproxima o funcionamento de linha de transmissão por equivalentes π (FUCHS, 1979). Por se tratar de uma linha de circuito duplo, cada circuito é composto por 6 seções π . A Tabela 27 mostra os parâmetros da linha equivalente de 500 kV e a Tabela 28 mostra os valores reais dos componentes empregados em cada seção para simular o equivalente da linha de 500 kV.

Tabela 27 – Parâmetros do Equivalente Linha de 500 kV

Resistência	Indutância	Capacitância
18 m Ω /km	940 μ H/km	11,3 nF/km

Tabela 28 – Parâmetros Reais de cada Seção π

Resistência	Indutância	Capacitância
31,8 m Ω	1,65 μ H	8,03 μ F

3.3.4 Sistema de Medição e Controle do Ensaio

De forma semelhante aos ensaios realizados na EESC utilizou-se um computador, uma PAD, um sistema de condicionamento de sinais e um sistema de controle de duração de faltas para o controle e coleta de dados dos ensaios de falta.

3.3.4.1 Computador e Placa de Aquisição de Dados

A placa de aquisição utilizada, Figura 33, possui 16 canais de entrada analógica de 16 bits, 8 canais de entrada/saída digitais e 2 canais de saída analógicas de 12 bits, sendo capaz de operar com taxa de amostragem máxima de 20 kS/s. Um computador *Intel Pentium IV* de 32 bits e clock de 2,0 GHz e 2 GB de memória RAM com o Sistema Operacional (SO) Linux Debian 5.0 (DEBIAN..., 2012) foi utilizado para controlar o ensaio e coletar as medidas de interesse. O Kernel do SO utilizado foi a versão 2.6.32 modificado para uso em tempo real pelo RTAI versão 3.7 (MANTEGAZZA; DOZIO; PAPACHARALAMBOUS, 2000).

Figura 33 – Foto da Placa de Aquisição de Dados Utilizada na SSE

3.3.4.2 Condicionamento de Sinal

Para o condicionamento das medidas de corrente foram utilizadas garras amperimétricas com sensibilidade de 10 mV/A e com leitura máxima de 200 A (Figura 34). Essas garras foram conectadas diretamente nos canais de entrada analógica da PAD através de cabos coaxiais. Foram empregadas ao total 7 garras para a coleta de dados.

O condicionamento de tensão utilizou transformadores de tensão para isolar e reduzir a magnitude dos sinais. Os sinais do secundário dos transformadores foram ligados a um circuito analógico para ajustar o ganho do sinal de tal modo a obter um sinal de $\pm 10 \text{ V}$. Foram empregados 4 circuitos para monitorar as tensões de interesse.

A corrente de campo foi medida através de um resistor de baixo valor ôhmico em série com o enrolamento de campo. A queda de tensão foi amplificada por um circuito com amplificadores diferenciais para reduzir o ruído de modo comum. Esse circuito envia para a PAD um sinal de $\pm 10 \text{ V}$.

Figura 34 – Garra Amperimétrica Utilizada na Medição de Corrente na SSE

3.3.4.3 Controle das Máquinas Elétricas

O controle do motor M_1^S foi feito pela técnica de enfraquecimento de campo. Um *chopper* de 1 quadrante foi utilizado para controlar a tensão aplicada ao enrolamento de

campo. Ao controlar a corrente de campo pode-se ajustar o torque exercido sobre o eixo de G_1^S , que por conseguinte determinar a potência ativa injetada por G_1^S na rede.

Como na UCM (Seção 3.2.4.4) um CI dedicado gera o sinal de PWM com frequência de $5,0\text{ kHz}$, que comanda as chaves estáticas, foi utilizado. Essa frequência de chaveamento é suficiente para garantir o regime de condução contínua da corrente de campo de M_1^S . O ciclo de trabalho do sinal de PWM é controlado por uma tensão de entrada de 10 Vp , proveniente de uma saída analógica da PAD. O sinal de PWM é transmitido à chave estática por meio de um acoplador óptico de alta velocidade, isolando eletricamente a PAD do circuito de alta potência.

Para controlar a tensão aplicada no campo de G_1^S não foi necessário o uso de *chopper* porque o próprio RCT proporciona este controle. Ao aplicar uma tensão de entrada do RCT entre 0 e 10 V tem-se a variação entre o mínimo e o máximo da tensão de campo de G_1^S . Deste modo, conectou-se a entrada do RCT diretamente a uma saída analógica da PAD.

3.3.4.4 Controle de Falhas

Nos ensaios realizados na SSE não foram controlados o ângulo de inserção de falta, pois não estava disponível um contator com bobina de corrente contínua. Logo, a falta era aplicada através de uma saída digital da PAD que acionava um temporizador mono-estável que controlava a duração da falta e comandava o contator de falta. O uso de um temporizador externo assegura que a falta não durará mais tempo que o pré-determinado independente do comando enviado pelo computador.

3.3.5 Pontos de Falta

Diferentemente do sistema da EESC, o gerador da SSE não possui derivações para faltas internas porque a máquina não foi projetada originalmente para esse propósito. No entanto, como a armadura do gerador é composta por barras de cobre foi possível o acesso a algumas barras do enrolamento. Para tanto, um dispositivo de bronze em forma de pinça foi confeccionado para conectar uma barra do enrolamento ao contator de falta. A Figura 35 mostra como foi fixado o dispositivo no enrolamento. Apesar do enrolamento de armadura ser composto por barras, nem todas estavam fisicamente acessíveis, restringindo as possibilidades de faltas. Os pontos de faltas externas foram aplicadas nos terminais do GS, no início, meio e fim da linha de transmissão. Além das faltas externas, foi possível realizar ensaios de falta tipo fase-terra a 25% da fase B, 50% da fase A, 75% da fase C e 100% de todas as fases.

A Figura 36 mostra as ligações elétricas das faltas fase-terra realizadas, onde estão indicadas todas medidas de corrente e tensão realizadas. Destaca-se que as medidas realizadas são as mesmas do sistema da EESC.

Figura 35 – Dispositivo de Inserção de Faltas

Figura 36 – Configuração de Medidas para Faltas em G_1^S

3.4 Discussão sobre a Conexão e Aterramento dos Geradores Síncronos

Os geradores podem ser conectados ao SEP e aterrados de diversas maneiras (INSTITUTE of ELECTRICAL and ELECTRONICS ENGINEERS, 2006a). Na maioria das instalações utiliza-se um transformador elevador fechado em $\Delta - Y$ para conectar o GS ao SEP (AMARAL, 2007). Para reproduzir essa configuração sem o uso de um transformador foi realizada, para ambos os sistemas, a análise comparativa com base nos circuitos de sequência (ANDERSON, 1995), com foco nas contribuições de corrente do gerador e do sistema a ele conectado. O circuito de referência considerou somente o gerador e seu transformador elevador, o restante do sistema foi representado como um equivalente visto a partir do secundário do transformador elevador. Esse circuito é mostrado na Figura 37(a), nesta X_k^G , X_k^T , X_k^S ($\forall k = 0, 1, 2$) são, respectivamente, as reatâncias de sequência do GS, do transformador elevador e do equivalente do restante do sistema. Foram analisadas duas

maneiras de conexão de G_1^E e G_1^R e à rede elétrica das universidades. Em uma delas o terminal neutro de G_1^E ou G_1^S conectado ao neutro da instalação local e na outra com o terminal neutro isolado. A Figura 37(b) mostra os circuitos de sequência caso o neutro de G_1^E ou G_1^S fosse conectado à rede e a Figura 37(c) mostra os circuitos nos quais o neutro está isolado.

Figura 37 – Circuitos de Sequência

Com interesse nas correntes que circulam no gerador enquanto este está sujeito a uma situação de falta, constata-se por comparação, que os circuitos das Figuras 37(a) e 37(c) são equivalentes. Portanto, optou-se pelo método de ligação do circuito de sequência apresentado na Figura 37(c), ou seja, somente as fases das máquinas síncronas foram conectadas, deixando isolado o terminal neutro. No sistema RTDS foi utilizado um transformador elevador para conectar G_1^R ao SEP simulado.

Outra questão importante a ser abordada é a maneira como o GS em ensaio foi aterrado. O método de aterramento tem influência direta sobre o comportamento dos eventos de falta, especialmente as faltas do tipo fase-terra onde a impedância de aterramento limita a magnitude da corrente de falta. Nos ensaios realizados foram adicionadas resistências de aterramento (R_n) de diversos valores para evitar possíveis danos causados pela inserção das faltas e para observar a influência desta na proteção do GS. As Tabelas 29 e 30 mostram os valores das resistências de aterramento utilizadas nos sistemas EESC e SSE, respectivamente.

Tabela 29 – Resistências de aterramento utilizadas no Sistema EESC

R_n^1	R_n^2	R_n^3
9,0 Ω	27,0 Ω	56,0 Ω

Tabela 30 – Resistências de aterramento utilizadas no Sistema SSE

R_n^1	R_n^2	R_n^3	R_n^4
$0,0 \, \Omega$	$1,7 \, \Omega$	$8,5 \, \Omega$	$\infty \, \Omega$

3.5 Ensaios de Falta

Esta seção apresenta os controles utilizados nos sistemas EESC e SSE para o ajustar os pontos de carregamento dos GSs ensaiados, o controle do ângulo de incidência de falta empregado no sistema EESC, como foram coletadas as medidas elétricas de interesse e por fim a sequência de execução dos ensaios de falta.

3.5.1 Controle dos Pontos de Carregamento

A princípio os ensaios foram conduzidos sem a utilização de malhas de controle. Os pontos de carregamento eram ajustados manualmente por meio de reostatos. No entanto, constatou-se que essa abordagem era muito demorada, pois a cada ensaio de falta era necessário retomar todos os ajustes a partir do zero. Outra desvantagem desta metodologia é o erro de ajuste, que modifica as condições de pré-falta, influenciando as formas de onda durante os eventos de faltas.

Deste modo, decidiu-se implementar o controle automático do carregamento de G_1^E e G_1^S . Com a implementação destes controles foi possível realizar uma grande sequência de ensaios de forma automatizada, rápida e com precisão das condições de pré-falta.

Todos os controles são do tipo PI e a preocupação principal do ajuste dos controles foi o baixo erro de regime e pequeno sobre-sinal. Para uma primeira aproximação dos parâmetros dos controles, as plantas foram simuladas com auxílio do programa *Simulink*[®] (CAVALLO; SETOLA; VASCA, 1996). Durante os testes dos controles, as constantes dos PI foram modificadas empiricamente para que o comportamento desejado dos controles fosse alcançado. Um detalhe importante nesta modelagem foi a inclusão de ruídos às medidas, uma vez que um alto ganho proporcional associado a um sinal ruidoso pode levar a uma ação de controle instável. Para isso fez-se uma análise nas características do ruído presente nos equipamentos de medição e com um bloco de ruído branco adicionou-se o ruído de medida na modelagem dos controles. Para obter as características do ruído presente nos sistemas de condicionamento e aquisição mediu-se a tensão dos canais responsáveis pelas medidas elétricas sem que os mesmos desconectados do ensaio. Com as medidas obtidas determinou-se o valor de pico a pico máximo entre os canais, este foi utilizado no modelo de ruído branco disponível no *Simulink*[®].

Foram implementados controladores PI discretos a partir de parâmetros de controles contínuos. Por se tratar de um controle prático, portanto restrito a limites físicos de operação, e por causa da utilização de um controle integrativo é necessário considerar o efeito *wind-up*. Esse problema foi contornado pelo desligamento da porção integrativa do

controle quando se detecta a saturação do sinal de saída.

3.5.1.1 Controle da Potência Reativa Fornecida/Consumida por G_1^E e G_1^S

O controle da potência reativa no sistema EESC foi feito pela atuação sobre a tensão de campo do G_1^E por meio de um *chopper* da UCM. Foram medidos os valores de tensões e correntes instantâneas das três fases do G_1^E . A partir destas medidas calculou-se a potência reativa.

Já para o sistema da SSE, a atuação do controle recai sobre a entrada do RCT. De maneira semelhante ao sistema EESC mediram-se as tensões e correntes das fases de G_1^S para calcular a potência reativa e realimentar o controlador. As Figuras 38(a) e 38(b) ilustram os diagramas de blocos dos controles implementados. Nestas observam-se que as saídas dos controladores estão limitadas entre 0 e 10 V, pois este intervalo obtém-se o valor mínimo e máximo da tensão de campo para os sistemas EESC e SSE.

Figura 38 – Diagramas de Blocos dos Controles de Potência Reativa

As Tabelas 31 e 32 mostram os parâmetros dos PIs de controle de potência reativa do sistema EESC e SSE, respectivamente. Nestas tabelas, K e T_i representam o ganho proporcional e a constante de tempo integral.

Tabela 31 – Parâmetros do Controle de Potência Reativa (Sistema EESC)

Parâmetros	Valor
K	5,0E-05
T_i	0,008 s

Tabela 32 – Parâmetros do Controle de Potência Reativa (Sistema SSE)

Parâmetros	Valor
K	5,9E-05
T_i	0,009 s

3.5.1.2 Controle da Potência Ativa Fornecida por G_1^E e G_1^S

O sistema de controle da potência ativa fornecida pelos GSs seguiu o mesmo padrão para os sistemas EESC e SSE (Figura 39). O controle de potência ativa baseia-se no

controle da tensão de campo de M_1^E e M_1^S , que operam como fontes motrizes de G_1^E e G_1^S , respectivamente. Através da variação da tensão de campo dos MCCs (enfraquecimento de campo) varia-se o torque aplicado no eixo dos GSs. O incremento do torque no eixo dos GSs aumenta a potência ativa fornecida por estes às redes elétricas.

No diagrama de blocos da Figura 39, observa-se um laço de controle de corrente interno ao laço de controle de potência ativa. Esse controle ajusta a corrente de campo das máquinas de acordo com o valor de saída do PI de potência ativa. Desta maneira garante-se que a corrente de campo fique dentro dos limites pré-estabelecidos (I_{fd}^{max} e I_{fd}^{min}), evitando principalmente a redução excessiva da corrente de campo que pode danificar o MCC.

Para calcular a potência ativa foram medidos os valores de tensões e correntes instantâneas das três fases dos GSs. A potência ativa é a variável a ser controlada pelos PIs que atuam sobre as plantas por meio do ajuste dos ciclos de trabalho dos *choppers*, mudando a tensão aplicada nos campos dos MCCs.

Figura 39 – Diagrama de Blocos dos Controles de Potência Ativa

Os parâmetros dos PIs de controle de potência reativa do sistema EESC e SSE são mostrados nas Tabelas 31 e 32, respectivamente. Nestas, K^P e T_i^P representam o ganho proporcional e a constante de tempo integral do controle de potência ativa, e K^I e T_i^I são o ganho proporcional e a constante de tempo do controle de corrente de campo.

Tabela 33 – Parâmetros do Controle de Potência Ativa (Sistema EESC)

Parâmetros	Valor
K^P	2,4E-05
T_i^P	0,034 s
K^I	5,5
T_i^I	0,800 s

3.5.1.3 Pontos de Operação de G_1^E e G_1^S

Cada situação de falta foi repetida para diversos pontos de operação dos GSs. Para o sistema EESC foram escolhidos seis pontos de operação distribuídos no interior da curva de capacidade e para o sistema SSE foram utilizados cinco pontos. As Figuras 40(a) e 40(b)

Tabela 34 – Parâmetros do Controle de Potência Ativa (Sistema SSE)

Parâmetros	Valor
K^P	5,9E-05
T_i^P	0,008 s
K^I	2,75
T_i^I	0,400 s

mostram os pontos de carregamento utilizados. Os pontos escolhidos buscaram explorar algumas condições em que os GSs podem operar. As Tabelas 35 e 36 detalham os pontos de operação escolhidos para cada um dos sistemas de ensaio.

Figura 40 – Pontos de Operação dos Ensaios de Falta

Tabela 35 – Pontos de Operação do Sistema EESC

Ativa(W)	1700	1600	1500	1000	1200	1000
Reativa(var)	0	900	-900	-1500	0	1000

Tabela 36 – Pontos de Operação do Sistema SSE

Ativa(W)	2100	2760	2400	2760	2100
Reativa(var)	2000	890	0	-890	-1000

3.5.2 Ângulo de Inserção de Falta

No sistema de ensaios da EESC, o ângulo de incidência da falta foi controlado para observar a influência deste no tempo de atuação da proteção tradicional e inteligente.

O ângulo de incidência da falta é o ângulo da tensão, usada como referência, em que a situação de falta é inserida podendo variar entre 0 e 360 graus. O algoritmo desenvolvido com o propósito de controlar o fechamento do contator de falta recebe um sinal digital para inserir a falta. Este espera até que a forma de onda cruze o zero e após o período de

tempo equivalente ao ângulo de incidência desejado, descontando o atraso de acionamento do contator, envia o comando de fechamento para o contator de falta (C_2 na Figura 19). O contator permanece fechado por apenas cinco ciclos, sendo desligado após passado este tempo. Nos ensaios realizados escolheu-se a fase A como referência e foram utilizados os seguintes ângulos: 0° , 90° , 180° , 270° .

3.5.3 Medidas Elétricas Realizadas em G_1^E e G_1^S

O objetivo dos ensaios é obter as oscilografias de eventos de faltas em diversas condições. A lista das medições e suas descrições que compõem as oscilografias obtidas são apresentadas na Tabela 37. A tabela destaca quais medidas foram realizadas em cada sistema. No sistema EESC foram coletadas informações extras sobre a corrente e tensão de falta e sobre a velocidade angular de G_1^E , isso se deve à disponibilidade de sensores para realizar essas medições. No caso do sistema SSE, as variáveis mostradas na Tabela 37 são suficientes para o desenvolvimento deste trabalho. A taxa de amostragem usada na coleta de dados foi de 16 amostras por ciclo. Utilizou-se essa taxa porque a maioria dos relés comerciais digitalizam os sinais de entrada com taxa igual ou inferior a essa.

Tabela 37 – Medições Elétricas Realizadas Durante os Ensaios

Símbolo	Descrição
i_x^t	Corrente instantânea da fase $x = a, b, c$ próxima aos terminais de G_1^E/G_1^S
i_x^n	Corrente instantânea da fase $x = a, b, c$ próxima ao neutro de G_1^E/G_1^S
i_n	Corrente instantânea no neutro de G_1^E/G_1^S
i_{fd}	Corrente de campo de G_1^E/G_1^S
v_x	Tensão instantânea da fase $x = a, b, c$ de G_1^E/G_1^S com referência ao terra
i_f	Corrente instantânea de falta de G_1^E
v_f	Tensão instantânea de falta de G_1^E
ω	Velocidade angular de G_1^E

Os pontos onde foram inseridos os sensores para realizar as medições destacadas na Tabela 37 para o sistema EESC e SSE podem ser vistos nas Figuras 30 e 36, respectivamente.

3.5.4 Sequência de Execução dos Ensaios de Falta

Os ensaios de faltas em ambos os sistemas de ensaio foram realizados de forma automatizada. A única diferença na sequência dos ensaios foi que para o sistema da SSE não foi controlado o ângulo de incidência de falta. As lógicas utilizadas para a execução dos ensaios no sistema EESC e SSE são mostradas nos Algoritmos 1 e 2, nesta mesma ordem.

Algoritmo 1 Sequência de Execução dos Ensaios no Sistema EESC

- 1: Inicialmente o tipo de falta é configurado através do contator de falta (C_2 na Figura 19).
- 2: A seguir parte-se M_1^E manualmente, acelerando G_1^E . Ajusta-se a tensão terminal de G_1^E para o mesmo valor da tensão da rede elétrica. Também controla-se a velocidade do conjunto para o valor de frequência da rede;
- 3: Através de dispositivos que indicam sincronismo entre o GS e rede elétrica observa-se o sincronismo entre G_1^E e a rede. Caso se observe o sincronismo, fecha-se o contator que liga G_1^E a linha de transmissão. Caso contrário, ajusta-se a tensão e/ou frequência de G_1^E até que o sincronismo seja atingido.
- 4: O controle de potência ativa e reativa são ligados;
- 5: Aguarda-se trinta segundos para que os controles de potência ativa e reativa estabilizem;
- 6: Monitora-se o ângulo da tensão da fase na qual ocorrerá a falta. Quando este for igual ao valor pré-especificado, envia-se o comando de fechamento de contator de falta;
- 7: Após cinco ciclos de onda, desliga-se o contator de falta. Evita-se deste modo o estresse dos enrolamentos. Além disso, este tempo é suficiente para a coleta de informações desejadas;
- 8: As oscilografias são salvas automaticamente pelo computador que controla o ensaio;
- 9: Modifica-se o ângulo de incidência da falta e retorna ao Passo 5.
- 10: Após a varredura de todos os ângulos de incidência da falta, modifica-se o ponto de operação, pela mudança dos valores de referência dos controles de potência ativa e reativa e retorna-se ao Passo 5;
- 11: Após todos os pontos de operação serem ensaiados, volta-se ao Passo 1, modificando o tipo de falta.

Algoritmo 2 Sequência de Execução dos Ensaios no Sistema SSE

- 1: Inicialmente o tipo de falta é configurado através do contator de falta;
- 2: A seguir parte-se M_1^S manualmente, acelerando G_1^S . Ajusta-se a tensão terminal de G_1^S para o mesmo valor da tensão da rede elétrica. Também controla-se a velocidade do conjunto para o valor de frequência da rede elétrica;
- 3: Através de dispositivos que indicam sincronismo entre o GS e a rede observa-se o sincronismo entre G_1^S e a rede. Caso se observe o sincronismo, fecha-se o contator que liga G_1^S a linha de transmissão. Caso contrário, ajusta-se a tensão e/ou frequência de G_1^S até que o sincronismo seja atingido.
- 4: O controle de potência ativa e reativa são ligados;
- 5: Aguarda-se trinta segundos para que os controles de potência ativa e reativa estabilizem;
- 6: Envia-se o comando de fechamento para o contator de falta;
- 7: Após cinco ciclos de onda, desliga-se o contator de falta;
- 8: As oscilografias são salvas automaticamente pelo computador que controla o ensaio;
- 9: Modifica-se o ponto de operação, pela mudança dos valores de referência dos controles de potência ativa e reativa e retorna-se ao Passo 5;
- 10: Após a varredura de todos os pontos de operação, volta-se ao Passo 1.

3.6 Resultados e Discussão

Esta seção traz os resultados do funcionamento dos controles implementados e também mostra algumas oscilografias obtidas nos ensaios de falta.

3.6.1 Controle do Ângulo de Falta

Para avaliar o desempenho do controle do ângulo de incidência da falta do sistema EESC o esquema mostrado na Figura 41 foi montado. Para tanto, dois canais de medição de tensão e um contator com bobina CC foram empregados. Um dos canais monitorou a tensão da rede elétrica. O contator foi ligado entre a rede elétrica e o segundo canal de medição, medindo desta forma a tensão na saída dos contatos do contator. O algoritmo monitorou o sinal da rede e comandou o fechamento do contator para alguns determinados ângulos.

A Figura 42 mostra os gráficos dos resultados dos testes considerando os ângulos de falta de 0° , 90° , 180° e 270° . Os resultados podem ser considerados satisfatórios, pois apresentam desvios inferiores à $\pm 22,5^\circ$, que equivale a um ponto de amostragem quando empregada uma taxa de amostragem de 16 pontos por ciclo. Destaca-se que, o algoritmo

também respeitou o tempo determinando para a duração da falta, neste caso cinco ciclos.

Figura 41 – Esquemático para Avaliar o Controle do Ângulo de Incidência de Falta

Figura 42 – Teste do Controle do Ângulo de Falta

3.6.2 Controle da Potência Ativa Fornecida por G_1^E e G_1^S

Para verificar o funcionamento do controle de potência ativa de ambos os sistemas aplicou-se a resposta ao degrau. Para o sistema EESC, inicialmente ajustou-se o valor de referência do controle para o valor nulo e em seguida ajustou-se este para 1 kW. A resposta

do controle é mostrada na Figura 43(a), na qual verifica-se que após 9 s a potência ativa estabilizou no valor desejado com erro de regime de $\pm 50 \text{ W}$ (5%).

Para o sistema SSE, modificou-se o valor de referência de zero para 2 kW. Verifica-se, a partir da Figura 43(b), que a potência ativa atingiu o valor desejado em 9 s com erro de regime de $\pm 50 \text{ W}$ (2,5%). Pode-se observar que a resposta do controle de potência ativa do sistema SSE não apresentou sobre-sinal isso se deve a maior inércia das máquinas e a adição de uma roda de inércia ao eixo de M_1^S .

Figura 43 – Respostas dos Controles de Potência Ativa

3.6.3 Controle da Potência Reativa Fornecida/Consumida por G_1^E e G_1^S

De maneira semelhante ao ensaio anterior ajustou-se inicialmente o valor de referência do controle para o valor nulo e em seguida ajustou-se este para 800 var no sistema EESC e 1000 var para o sistema SSE. As respostas dos controles são mostradas nas Figuras 44(a) e 44(b).

Verifica-se que, para o sistema EESC, o após 3,5 s a potência reativa estabilizou no valor desejado com erro de regime de $\pm 20 \text{ var}$ (2,5%). O controle do sistema SSE apresentou erro de regime de $\pm 40 \text{ var}$ (4,0%) e o tempo de acomodação foi de 3 s.

3.6.4 Oscilografias dos Ensaios de Falta

A seguir são mostrados os resultados de alguns casos de faltas para ambos os sistemas de ensaios. Foi escolhido um resultado para cada tipo de falta. Os resultados apresentados mostram as medidas realizadas conforme indicado nas Figuras 30 e 36. Nos gráficos das figuras apresentadas podem ser vistas as correntes de entrada e saída de cada uma das fases do G_1^E e G_1^S , a corrente de campo e as tensões das fases.

Figura 44 – Respostas dos Controles de Potência Reativa

A Figura 45 mostra as medidas obtidas para o caso de uma falta fase-terra franca envolvendo 22,5% (D06-TERRA) do enrolamento da fase A, com ângulo de incidência foi de 90° . Nesta situação G_1^E estava fornecendo 1200 W com fator de potência unitário. Observou-se uma pequena diferença entre a corrente da fase A que circula próxima ao neutro e nos terminais do GS. Essa diferença corresponde à contribuição de corrente de G_1^E à falta. A corrente de falta i_f observada foi de aproximadamente 1 A (0,25 p.u.), essa magnitude de corrente se deve à resistência de aterramento ($R_n = 27 \Omega$). Destaca-se que a corrente de neutro tem a mesma magnitude da corrente de falta isso é causado por que a falta aplicada é do tipo fase-terra logo a corrente de falta circula pelo terminal neutro. A corrente de campo não apresentou mudanças significativas em sua magnitude.

Um caso de falta entre espiras que englobou aproximadamente 2,8% (D23-D24) de um dos caminhos da fase A é mostrado na Figura 46. O ângulo de incidência foi de 270° . O GS fornecia 1600 W e 900 var (capacitivo) antes da incidência da falta. Não se observaram mudanças significativas nas tensões e correntes, com exceção da corrente de falta que teve seu valor máximo em 20 A. Observa-se que a forma de onda corrente de falta não é perfeitamente senoidal, uma possível explicação para essa distorção é a saturação do circuito magnético próximo das espiras em curto-circuito.

A Figura 47 mostra a oscilografia de caso de uma falta fase-fase envolvendo 94,9% do enrolamento da fase A e 25% do enrolamento da fase C (D24-D08), o ângulo de incidência foi de 0° . Nesta situação o GS estava fornecendo 1600 W com fator de potência unitário. A tensão da fase A sofreu um forte decréscimo e a tensão da fase C apresentou uma pequena redução. Isso se deve ao percentual dos enrolamentos submetidos à falta. A corrente de falta foi bem elevada, na ordem de 80 A. A corrente de neutro foi aproximadamente nula pois a falta aplicada não envolveu o terra. Observa-se na corrente de campo uma oscilação com frequência de 120 Hz com amplitude de $\pm 0,8$ A acrescida ao valor em regime. A falta aplicada alterou a simetria elétrica dos enrolamento de armadura e causou a circulação de altas correntes nas fases A e C. Deste modo, o campo magnético resultante no estator

Figura 45 – Oscilografia de Falta Fase-Terra (Fase A) do Sistema EESC

Figura 46 – Oscilografia de Falta Entre-Espiras (Fase A) do Sistema EESC

não está equilibrado contendo o componente de segundo harmônico que é induzido no circuito de campo.

Figura 47 – Oscilografia de Falta Fase-Fase (Fase A-C) do Sistema EESC

A Figura 48 mostra as medidas obtidas para o caso de uma falta entre os dois caminhos da fase A (D24-D09), o ângulo de incidência foi de 180° . Nesta situação G_1^E estava fornecendo 1000 W e 1000 var (capacitivo). A tensão da fase em falta sofreu uma grande redução e a corrente de falta i_f foi de aproximadamente 60 A. A tensão da fase A reduziu-se a aproximadamente $75 V_p$. A corrente de campo apresentou oscilação com frequência de 120 Hz e amplitude de $0,3 A_p$. A corrente de neutro apresentou valor nulo. Observa-se a elevação das correntes da fase A e C. Uma possível explicação para a elevação da corrente na fase C é o acoplamento magnético entre as bobinas em falta e as bobinas da fase C. De acordo com o enrolamento planejado apresentado na Figura 96 no Apêndice A uma das bobinas da fase A compartilha a ranhura de número 11 com uma bobina da fase C.

Um caso de falta interna ao GS do sistema SSE é mostrado na Figura 49. O GS fornecia 2760 W e -890 var no momento da incidência da falta. A falta do tipo fase-terra foi aplicada a 25% da fase B. O GS estava configurado para $\tau'_{do} = 1,7 s$ e $R_n = 1,7 \Omega$. Não se observaram mudanças significativas nas tensões e correntes nos terminais de G_1^S , com exceção da corrente da fase B medida perto ao neutro e da corrente do neutro. Não se observou o aumento da corrente da fase B medida próxima ao terminal por causa da ausência de conexão do neutro com a rede elétrica da universidade como discutido na seção 3.4, logo, a rede da universidade não contribuiu para a corrente de falta. Isto pode

Figura 48 – Oscilografia de Falta Entre Caminhos (Fase A) do Sistema EESC

ser notado pela magnitude da corrente de neutro que é aproximadamente igual à corrente da fase B medida próximo ao neutro. A corrente de campo apresentou uma oscilação com pequena amplitude após a inserção da falta.

A Figura 50 mostra as medidas obtidas para o caso de uma falta fase-fase (AB) externa aplicada no meio da linha de transmissão do sistema SSE. Nesta situação G_1^S estava fornecendo 2100 W e -1000 var. O GS estava configurado para $\tau'_{do} = 2,6$ s e $R_n = 8,5$ Ω . As correntes fases A e B do GS tiveram picos maiores que 40 A. Observa-se uma grande distorção harmônica nas tensões nos terminais do GS, provavelmente devido a capacitância da linha de transmissão. As corrente das fases A e B medidas nos terminais e no neutro foram de aproximadamente de 50 A. Por se tratar de uma falta externa não há inversão de fase entre as corrente medidas próximo ao neutro em relação às medidas próximo aos terminais. Uma oscilação com pico de 8 A é notada na corrente de campo.

Este capítulo apresentou um esquema completo para realizar ensaios de faltas em GSs. Este esquema proporcionou de maneira segura a coleta de dados, na forma de oscilografias, de diversos sinais elétricos durante os transitórios causados pela inserção de faltas. O método de ensaio adotado permite o controle da condição de carregamento e do ângulo de inserção de falta. Dois GSs foram exaustivamente ensaiados e um destes teve seu enrolamento especialmente modificado para possibilitar a inserção de diferentes tipos de faltas em posições variadas.

Os resultados apresentados mostram que os controles empregados para o ajuste do car-

Figura 49 – Oscilografia de Falta Fase-Terra Interna (Fase B 25%) do Sistema SSE

Figura 50 – Oscilografia de Falta Fase-Fase Externa (Linha de Transmissão 50%) do Sistema SSE

regamento dos GSs foram satisfatórios para o ajuste da condição de pré-falta. O controle de inserção de falta apresentou erros inferiores a uma amostra. As oscilografias obtidas trouxeram informações importantes sobre comportamento dos sinais elétricos dos GSs, que subsidiaram a proposta de um novo esquema de proteção. A opção por ensaios em GSs reais forneceu informações reais do comportamento dinâmico deste tipo de máquina, propiciando desta maneira, o desenvolvimento mais seguro da nova técnica de proteção de GSs. O uso de dois sistemas de ensaios distintos propiciou maior diversidade às oscilografias obtidas. O sistema EESC proporciona ensaios vários tipos de faltas com destaque a falta entre-espiras, entre-caminhos e 24 posições de falta fase-terra. Embora o sistema SSE não proporcione a mesma variedade de tipos de faltas o RCT é capaz de emular o comportamento elétrico de GSs de diferente porte. Adicionalmente o sistema SSE conta com um modelo de linha de transmissão em escala reduzida que enriquece as oscilografias, uma vez que as formas de ondas coletadas estão mais próximas das situações encontradas em um SEP real. Destaca-se que, na literatura especializada não foi encontrado nenhum trabalho que aborde de maneira tão completa a coleta de dados de faltas em GSs.

Plataforma de Desenvolvimento e Teste em Tempo Real de Algoritmos de Proteção

Este capítulo apresenta o desenvolvimento de um sistema integrado de *software* e *hardware* cujo objetivo é servir de plataforma para desenvolver e executar em tempo real algoritmos de proteção aplicados a sistemas elétricos (MONARO et al., 2012b). O objetivo deste sistema é reduzir o tempo de desenvolvimento de novas funções de proteção, possibilitando a execução de testes em tempo real e não por meio de simulações computacionais, como é tipicamente encontrado na literatura. A plataforma desenvolvida possibilitou o teste embarcado em tempo-real do algoritmo de proteção proposto neste trabalho (seção 5.3). O teste embarcado teve como objetivo mostrar a aplicabilidade técnica do algoritmo de proteção proposto.

Este capítulo inicialmente apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre trabalhos que utilizam ou desenvolvem algum dispositivo para teste embarcado. Em seguida mostra-se a biblioteca (*OpenRelay*) elaborada para dar suporte ao desenvolvimento e implementação de algoritmos de proteção. Destacaram-se os principais componentes desta, assim como seu princípio de funcionamento. Posteriormente mostra-se o conjunto de *hardware* (*Cubo PC104*) utilizado para conduzir testes embarcados em tempo real das funções de proteção implementadas na biblioteca desenvolvida. Na sequência, testes foram realizados para avaliar o correto funcionamento da biblioteca *OpenRelay* em ambiente embarcado no *Cubo PC104*. Os testes foram conduzidos em tempo real. Os resultados obtidos foram comparados com as respostas de um relé comercial.

4.1 Revisão Bibliográfica

Existem trabalhos que abordam o desenvolvimento de dispositivos de proteção dispondo de componentes específicos de *hardware*. McLaren et al. (1994) propõem a utiliza-

ção de um *hardware* genérico para a implementação de relés de proteção. A utilização de módulos genéricos de *hardware* possibilita a extensão e expansão das capacidades deste conforme as necessidades. Essa propriedade possibilita que um engenheiro de proteção com algum conhecimento de *hardware* projete funções de proteção específicas a suas necessidades. O sistema projetado é composto por um elemento *Digital Signal Processor* (DSP) e um computador industrial 386. Em certo ponto do desenvolvimento, foi necessária a utilização de código de máquina de baixo nível (*assembly*) para aumentar o desempenho do sistema proposto, dificultando sua utilização por engenheiros de proteção.

O trabalho de Ruan e Lin (2005) apresenta o teste da utilização de um novo modelo de DSPs de baixo custo para a implementação de funções de proteção. A comparação com outros dispositivos foi feita através da implementação de ferramentas de extração fasorial utilizando a Transformada Discreta de Fourier (TDF) e o método dos mínimos quadrados. Constatou-se a superioridade do novo modelo de DSPs perante os utilizados tradicionalmente para implementação de relés de proteção.

O uso de *Field Programmable Analogic Arrays* (FPAAs) em conjunto com DSPs para a implementação de relés de distância com característica *mho* é proposto por Zadeh, Sidhu e Klimek (2009). Tal abordagem possibilita a obtenção das características de alta velocidade de atuação de dispositivos de estado sólido em conjunto com o monitoramento e comunicação dos dispositivos digitais. Além disso, deve-se ressaltar a flexibilidade obtida pela utilização de elementos analógicos programáveis, pois possibilita a mudança dos circuitos eletrônicos diretamente no dispositivo. Foram necessárias muitas unidades FPAAs para o desenvolvimento da plataforma devido à baixa densidade de elementos analógicos presentes em cada unidade.

Os trabalhos supracitados utilizam essencialmente DSPs para executar as operações necessárias para a proteção de SEPs. No entanto, implementar uma função de processamento digital de sinal como um *software* em um DSP frequentemente requer esforços consideráveis de projeto e verificação (STRANNEBY, 2001).

Com intuito de facilitar e diminuir o tempo de desenvolvimento deste processo, este capítulo propõe um conjunto de *hardware* e *software* projetado para servir de plataforma para desenvolvimento e execução em tempo real de novos algoritmos de proteção. O sistema proposto é composto por uma placa de processamento ligada a uma placa de aquisição de dados que seguem o padrão PC104 (PC/104 Consortium, 2009) e pelo emprego de um SO baseado no Linux. Logo, por utilizar placas de computadores e um SO de uso comum, os procedimentos de desenvolvimento e testes de novas funções de proteção são facilitados, pois pode-se empregar linguagens de programação de alto nível largamente utilizadas em microcomputadores convencionais, tais como C e C++. Estas características se destacam como as vantagens do sistema proposto em relação àqueles baseados em DSPs e FPAAs mencionados anteriormente.

4.2 Biblioteca *OpenRelay*

Os relés digitais têm seu princípio de funcionamento baseado no condicionamento, filtragem, digitalização e processamentos dos sinais elétricos provenientes do SEP. Por se tratar de um equipamento microprocessado, a proteção é realizada por meio de algoritmos, programas, dedicados à identificação de anomalias no funcionamento do elemento protegido.

Para facilitar a implementação dos algoritmos tradicionais e o desenvolvimento das técnicas inteligentes de proteção de GS optou-se pelo desenvolvimento de uma biblioteca, intitulada *OpenRelay*, que concentrasse todas funções necessárias para o funcionamento de um relé digital. Durante o desenvolvimento da biblioteca constatou-se que boa parte das funções de proteção tem implementações semelhantes, por exemplo, a proteção de sobretensão e sobrecorrente instantâneas diferem somente na natureza do sinal de entrada, pois o algoritmo computacional é estritamente igual. Essa característica se estende a outras funções de proteção e funções de medição, logo, a utilização de programação orientada a objetos se mostrou extremamente interessante, pois diminui o tempo de desenvolvimento e facilita a manutenção da biblioteca.

Adicionalmente decidiu-se extrapolar o uso da biblioteca para testes embarcados, que possibilitam o exame da aplicabilidade em campo das técnicas de proteção desenvolvidas e o teste comparativo de desempenho com os relés comerciais. No entanto, a maioria das aplicações embarcadas empregam placas de desenvolvimento microprocessadas que requerem um alto conhecimento de suas arquiteturas que são específicas e particulares da família de microprocessadores utilizada, isso aumenta demasiadamente o tempo de desenvolvimento. Pelos motivos apontados decidiu-se que a biblioteca seria desenvolvida com foco em placas com processadores de uso comum que comportem a utilização de SO de tempo real. Por se tratarem de placas de computadores e um SO de uso comum com modificações para tempo real, o teste embarcado se mostra facilitado pois o método de programação é o mesmo que utilizado tradicionalmente para programação e simulação em microcomputadores convencionais. O SO escolhido foi o Linux modificado por meio do *Real-Time Application Interface* (RTAI) (MANTEGAZZA; DOZIO; PAPACHARALAMBOUS, 2000), para funcionar em tempo real.

4.2.1 Sistemas Operacionais de Tempo Real

Um Sistema Operacional (SO) é um programa ou conjunto de programas cuja função é gerenciar os componentes físicos disponíveis no computador, sendo assim um intermediário entre outros programas e os componentes físicos. Além disso, serve de interface entre a máquina e o usuário final, permitindo assim seu controle (SILBERSCHATZ; GALVIN; GAGNE, 2004).

Os SOs estão presentes em sistemas embarcados, que são largamente utilizados para

controle e monitoramento de aplicações de risco, como em aviões, carros, plantas industriais, relés de proteção de SEPs, etc. Tais aplicações são caracterizadas como sistemas de tempo real, em que o tempo de resposta e tratamento a um evento deve ser pré-definido e obedecido, e caso não seja, pode resultar em severas consequências, como falhas. Assim, tais sistemas dependem de um monitoramento/controle correto e feito em tempo pré-definido (LAPLANTE, 2004). Sistemas embarcados podem tirar vantagem dos recursos oferecidos por um SO para o gerenciamento de um sistema de tempo real, no entanto, este SO deve atender certas necessidades definindo assim o SO de tempo real.

Um SO de tempo real deve atender os programas em execução (processos) de forma a atingir os requisitos de tempo necessário para a aplicação a qual serve. A diferença entre um SO de tempo real e um de propósito geral está basicamente no seu escalonador de processos, que é responsável por gerenciar o tempo de uso do processador para cada processo, alternando entre estes. O escalonador de um SO de tempo real precisa ser preemptivo, ou seja, os processos têm prioridades uns sobre os outros, permitindo que um processo de menor prioridade seja interrompido por um de maior, alcançando os tempos desejados. Existem alguns projetos que provêm suporte a sistemas operacionais de tempo real, entre estes destacam-se o QNX (QNX, 2013) e VxWorks (VXWORKS, 2013) com licença proprietária, e com licença *General Public License* (GPL) têm-se o Xenomai (XENOMAI, 2013) e o RTAI (MANTEGAZZA; DOZIO; PAPACHARALAMBOUS, 2000). Para este trabalho optou-se pelo uso do RTAI porque este é compatível como Linux e pelo suporte à aquisição de dados em tempo real proporcionado pela biblioteca Comedi (SCHLEEF; HESS; BRUYNINCKX, 2005).

4.2.1.1 *Real-Time Application Interface* (RTAI)

O Linux é um SO de código aberto, sob licença GPL, sendo utilizado em diversos campos, de computadores pessoais a supercomputadores. A grande flexibilidade provida pelo código aberto e a existência de documentação abundante faz deste uma alternativa atraente para a implementação de aplicações diversas.

No entanto, o Linux foi construído como um SO multiusuário de propósito geral e essa característica geralmente entra em conflito com as características de um SO de tempo real. Enquanto um SO de propósito geral tenta maximizar o desempenho médio do sistema ao custo de um descontrole sobre o tempo de execução de cada processo, um SO de tempo real tenta colocar um limite superior sobre este tempo de execução ao custo de diminuir o desempenho médio. Existem diferenças estruturais que dificultam o Linux operar como um SO de tempo real, dentre elas: chamadas de sistemas de kernel não preemptivas, paginação, algoritmo do escalonador de processos, reordenação de requisições e execução em lotes (ABBOTT, 2006, pg. 167)

Como alternativa aos SOs de tempo real proprietários e para aqueles que querem tirar vantagem do uso do Linux, surge o RTAI, uma extensão para fazer o Linux operar em

tempo real, permitindo assim o desenvolvimento de aplicações com restrições de tempo de resposta. O RTAI funciona baseado no modelo de abstração de interrupções, em que modificações fazem com que o Linux seja executado como uma tarefa de baixa prioridade em um pequeno kernel de tempo real. As funções de tempo real são tratadas como de alta prioridade neste pequeno kernel. O restante das aplicações, como gráficos e geração de relatórios são tratadas pelo Linux. A arquitetura do RTAI pode ser observada na Figura 51.

Figura 51 – Arquitetura do RTAI

Como pode ser observado, a arquitetura utilizada pelo RTAI possui uma camada intermediária entre o *hardware* e o kernel do SO Linux, o kernel de tempo real. Este kernel tem como característica a utilização de um escalonador de tarefas preemptivo, ou seja, ele tem controle sobre os tempos de execução de cada processo e consegue aplicar prioridades entre os mesmos. Deste modo, as interrupções do *hardware* são gerenciadas e o tempo de processamento dos processos de tempo real é dividido. Além disso, abaixo do kernel do Linux é inserida uma camada de abstração de *hardware*, *Real Time Hardware Abstraction Layer* (RTHAL), controlada por interrupções de programa provenientes do kernel de tempo real, fazendo com que os processos do Linux sejam gerenciados com baixa prioridade. A fim de se compartilharem informações entre os processos de tempo real e os processos do Linux, pode-se utilizar uma estrutura de dados como a *First In First Out* (FIFO), possibilitando a comunicação entre códigos em execução com diferentes níveis de privilégio.

4.2.2 Comedi: Common Measurement Device Interface

O Comedi (SCHLEEF; HESS; BRUYNINCKX, 2005) é o conjunto padrão de *drivers* e bibliotecas para aquisição de dados do Linux, iniciado em 1996 por David Schleeff. O Comedi busca suportar diversos fabricantes e modelos de placas através de uma interface comum, a *Application Programming Interface* (API).

O Comedi é separado em duas partes: o Comedi em si, um pacote de *drivers* que são carregados em espaço de kernel; o comedilib, que dá acesso em espaço de usuário a esses *drivers*. Programas utilizando o Comedi podem ser escritos em linguagem C ou C++.

O Comedi está organizado em canais, sub-dispositivos e dispositivos. Um canal é o nível mais baixo de medição e controle. Existem diversos tipos de canais que possibilitam:

- ❑ Leitura e escrita de sinais analógicos;
- ❑ Leitura e escrita de sinais digitais;
- ❑ Contadores de pulso e frequência;
- ❑ Geração de pulsos;
- ❑ Leitura de *encoders*.

Os canais de um mesmo tipo são agrupados em um conjunto comum, chamado sub-dispositivo. Os sub-dispositivos são agrupados em um dispositivo. A Figura 52 ilustra esta organização.

Figura 52 – Organização do Comedi

Através de um conjunto de funções disponíveis no comedilib é possível acessar os vários dispositivos uma placa de aquisição de dados.

4.2.3 Organização da Biblioteca

A biblioteca *OpenRelay* foi estruturada sobre sete classes principais das quais as demais classes herdam suas propriedades. As classes mães são *Relay*, *Acquisition*, *Measure*, *Logic*, *Protection*, *Display* e *SaveData* e cada uma dessas é dedicada a uma funcionalidade específica. A classe *Relay* controla a execução do programa. A Figura 53 mostra as inter-relações entre as classes.

Nota-se que o bloco *Channel* mantém relações com todos os outros blocos funcionais. Ele é um elemento chave nesta biblioteca, pois é sobre esse que as classes realizam as

Figura 53 – Organização da Biblioteca *OpenRelay*

trocas das informações necessárias ao seu funcionamento. As setas indicam o sentido das trocas de informação (leitura/escrita). Associados à classe *Acquisition* são mostrados os dois métodos em que a biblioteca pode receber informações do meio externo: via placa de aquisição de dados ou por meio de um arquivo de entrada.

4.2.4 Classe *Relay* e Fluxo de Execução

O fluxo de execução do programa é controlado pela classe *Relay*. É com o auxílio desta classe que o usuário define os componentes do relé que deseja implementar. Primeiramente, define-se o tipo da aquisição. Depois povoam-se os atributos (listas) que armazenam todas as instâncias das classes as quais o usuário deseja que sejam executadas. As listas estão citadas abaixo:

- ❑ *MeasureList*: Lista de execução das instâncias da classe *Measure* e suas sub-classes;
- ❑ *ProtectionList*: Lista de execução das instâncias da classe *Protection* e suas sub-classes;
- ❑ *LogicList*: Lista de execução das instâncias da classe *Logic* e suas sub-classes;
- ❑ *OscillographyList*: Lista de execução das instâncias da classe *Oscillography*.

Para tanto, todas as classes mães, e por heranças as derivadas, têm um método chamado de *Run()* que contém o algoritmo de execução específico de cada classe. A cada passo de execução a classe *Relay* executa o método *Run()* da classe *Acquisition* e depois os métodos *Run()* de cada instância armazenada nas listas de execução. Quando todos os itens das listas forem varridos, o programa aguarda uma interrupção de tempo para para recomençar o processo. Essa interrupção é gerada por uma função do RTAI que gera interrupções periódicas e é essa função que controla a taxa de amostragem do programa. A Figura 54 traz um fluxograma explicativo deste processo.

Para possibilitar a operação em tempo real a classe *Relay* é executada como uma *thread* do RTAI de máxima prioridade. Quando uma oscilografia é criada, é necessário salvá-la

Figura 54 – Fluxo de Execução da Biblioteca *OpenRelay*

em disco; no entanto, operações de escrita em disco são lentas, logo inviáveis de serem executadas em tempo real. Por causa disso, assim que uma oscilografia é obtida, cria-se uma *thread* de baixa prioridade para salvá-la em disco. Essa *thread* só existirá enquanto a operação de escrita em disco estiver em curso. Outra *thread* de baixa prioridade é a execução do método de impressão em tela, coordenada pela classe *Display*. Como não é conveniente que as informações da tela sejam atualizadas muito rapidamente, o que dificulta sua visualização e interpretação, essa classe é executada periodicamente em intervalos de algumas centenas de milissegundos.

Destaca-se que antes da criação das *threads* a classe *Relay* verifica a coerência, através do método *Prepare()* das classes *Acquisition* e suas filhas, entre os canais criados e o tipo de aquisição empregado. Essa verificação é específica de cada tipo de aquisição e será discutida conjuntamente com a classe *Acquisition*. Depois da verificação, é executada a lista de aquisição até que o *buffer*, cujo tamanho é definido pelo usuário, esteja completo. Estas etapas preliminares estão destacadas em cinza na Figura 54. Finalizada essas etapas com sucesso, as funções de medição e proteção são incluídas ao roteiro de execução.

4.2.5 Classe *Channel*

O funcionamento de um relé necessita de informações sobre o equipamento sob proteção. No entanto, alguns algoritmos de proteção, medidas e oscilografias necessitam de informações pretéritas. Contudo, é necessário o armazenamento temporário de um con-

junto de medidas. Nesta biblioteca implementou-se uma classe específica, denominada *Channel*, para a troca de informações, que se trata de um *buffer* circular.

De uma maneira geral pode-se definir um *buffer* como sendo uma região de memória temporária para escrita e leitura de dados. A Figura 55 ilustra o princípio de funcionamento do *buffer* circular de tamanho N . Por convenção, a amostra mais nova é armazenada na posição 1. Quando uma nova amostra é obtida a amostra que ocupava a posição 1 vai ocupar a posição 2 e a amostra que ocupava a última posição (N) é descartada.

Figura 55 – Buffer Circular

Os objetos dessa classe diferem quanto à natureza das informações armazenadas que podem ser sinais analógicos, complexos ou digitais, ou quanto a sua interface com o ambiente externo. Os canais de informação podem ser do tipo entrada, nos quais seu conteúdo provém de um arquivo de entrada, das entradas de uma PAD ou de um pacote de dados recebido via placa de rede. Já os canais do tipo saída atribuem seus conteúdos às saídas de uma PAD, a um arquivo ou a um pacote de dados a ser enviado pela rede. Também existem os canais internos que servem para armazenamento de informações utilizadas internamente pelas demais classes, sem interface com informações externas. Os canais analógicos podem ser definidos como saturáveis ou não saturáveis, sendo que este atributo é importante quando deseja-se impor limites aos valores armazenados. Um exemplo de utilização seria o uso de uma saída analógica de uma PAD, uma vez que sua ação está restrita a limites físicos de operação. A Figura 56 mostra os diversos tipos de canais passíveis de utilização.

Figura 56 – Tipos de Canais

4.2.6 Classe *Acquisition*

A aquisição é a etapa em que se obtêm os valores de tensão e corrente necessários às funções de monitoramento e proteção às quais o relé foi programado. Cada uma dessas variáveis monitoradas tem um canal associado.

Na biblioteca *OpenRelay*, a aquisição se divide em dois grupos, que são através de uma PAD (*HardwareAcquisition*) ou de um arquivo (*FileAcquisition*). Após a aquisição, tudo funcionará da mesma forma tanto para os dados obtidos a partir da PAD ou de arquivo. O usuário pode escolher a taxa de amostragem para todos os métodos. Os dois métodos de aquisição de dados são apresentados e suas principais características são discutidas nas duas subseqüentes sub-seções.

4.2.6.1 *FileAcquisition*

Ao utilizar a aquisição por meio de arquivo, uma rotina verifica a taxa de amostragem do arquivo de entrada e realiza a reamostragem. A reamostragem é feita em três etapas. Primeiramente, encontra-se, por meio da Equação 2, o máximo divisor comum entre a taxa de amostragem do arquivo de entrada (ω_{arq}) e a taxa desejada (ω_{des}). Depois realiza-se uma sobre-amostragem por um fator l (Equação 3) empregando o método de interpolação linear. Em seguida aplica-se uma subamostragem inteira por um fator m (Equação 4).

$$mdc = \frac{\omega_{arq}}{\omega_{des}}, \quad (2)$$

$$l = \frac{\omega_{des}}{mdc}, \quad (3)$$

$$m = \frac{\omega_{arq}}{mdc}. \quad (4)$$

Após a reamostragem é aplicada uma filtragem por meio de um filtro *Butterworth* de segunda ordem com frequência de corte igual à metade da frequência de amostragem. A filtragem tem como objetivo evitar o efeito *Aliasing*. Em seguida, a critério do usuário, o sinal filtrado pode passar por uma etapa de quantização de $N - bits$, que simula o processo de digitalização. Essas etapas têm como objetivo aproximar os testes usando aquisição de dados por meio de arquivo à aquisição utilizando uma PAD.

Nesta classe cada canal do tipo externo de entrada está associado a uma coluna do arquivo de entrada. O método *Prepare()* verifica se o arquivo pode ser lido e se contém todas as colunas requisitadas pelos canais. Depois o método processa a reamostragem, filtragem e quantização de todo o arquivo de entrada, armazenando o resultado em um *buffer*.

O método *Run()* a cada aquisição lê uma posição do *buffer* e disponibiliza aos canais associados. Quando a última posição do *buffer* é lida encerra-se o programa.

4.2.6.2 *HardwareAcquisition*

Usando esse tipo de aquisição, diferentemente da classe *FileAcquisition*, o programa é executado perpetuamente até que o usuário decida encerrá-lo. Os canais externos de entrada e saída estão conectados às entradas e saídas da PAD. Aqui as etapas de condicionamento dos sinais de tensão e corrente e a filtragem *anti-aliasing* são realizadas pelos filtros analógicos do sistema de condicionamento pré-existente.

Nesta classe, o método *Run()* acessa a PAD e realiza a leitura de todas as entradas associadas aos canais externos de entrada e depois escreve na saída da PAD o valor contido nos canais externos de saída. Os canais associados à aquisição são agrupados em quatro conjuntos:

1. Entradas analógicas;
2. Entradas digitais;
3. Saídas analógicas;
4. Saídas digitais.

As operações de leitura e escrita na PAD seguem a ordem enumerada acima. Todos os acessos à PAD são realizados de maneira sequencial e sem intervalo de tempo entre acessos. No entanto, existe o atraso intrínseco ao tempo de conversão do Conversor Analógico Digital (CAD) e do Conversor Digital Analógico (CDA) da PAD. O tempo gasto na conversão cria uma defasagem angular entre os valores lidos. Como o tempo de conversão é pequeno para a maioria das PADs disponíveis atualmente, optou-se em não realizar a compensação de defasagem angular.

O método *Prepare()* verifica se as entradas e saídas solicitadas pelos canais existem e se estão disponíveis para acesso. Além disso, este método observa se a taxa de amostragem solicitada é compatível com a PAD.

Como mencionado anteriormente, o controle de acesso à PAD foi viabilizado pela biblioteca Comedi. As operações de leitura e escrita foram simplificadas, pois a biblioteca propicia funções que convertem os valores lidos do CAD para valores físicos, como por exemplo a leitura de uma entrada analógica é dada em volts. De maneira semelhante, os valores físicos são convertidos e escritos no CDA de maneira transparente.

4.2.7 Classe *Measure*

A classe *Measure* e suas derivações são dedicadas aos cálculos de medidas derivadas, a partir dos valores instantâneos de tensão e/ou corrente. Como exemplo de medidas derivadas tem-se: potência, frequência e fasor. As funções que realizam esses cálculos geralmente recebem informações de um ou mais canais de entrada ou internos, e armaze-

nam os valores das medidas realizadas em outros canais internos. Os tipos de medições e de funções que a biblioteca *OpenRelay* é capaz de executar são:

☐ Valor eficaz;	☐ Módulo;
☐ Frequência;	☐ Argumento;
☐ Transformada Discreta de Fourier;	☐ Entropia;
☐ Potência ativa e reativa monofásica e trifásica;	☐ Derivada;
☐ Soma/Subtração;	☐ Integral;
☐ Produto/Divisão;	☐ Corrente de Operação e Restrição;
☐ Somatória;	☐ Componentes de Sequência Positiva, Negativa e Zero;
☐ Média móvel;	☐ Filtro <i>Washout</i> .

Além das sub-classes listadas anteriormente desenvolveu-se classes derivadas dedicadas ao uso de RNAs, LF e TW. Estas três sub-classes possibilitam a execução em tempo-real de algoritmos de proteção que empreguem as técnicas supracitadas.

4.2.7.1 Sub-classe *RNA*

A classe *RNA* é uma classe derivada da classe *Measure*. A função desta classe é a execução de Redes Neurais Artificiais (RNAs) previamente treinadas dentro do ambiente da biblioteca *OpenRelay*.

Para tanto, utilizou-se a biblioteca *Fast Artificial Neural Network Library* (FANN) (NISSEN, 2003), pois é uma das mais completas e atuais entre as bibliotecas sob licença GPL. Entre suas propriedades, destaca-se a velocidade de treinamento e execução (*forward*).

A classe *RNA* somente usa as funções de execução da FANN. Geralmente o processo de treinamento usa um grande conjunto de dados. Isso exige um grande tempo de processamento que não é compatível com os requisitos de tempo para execução de um relé de proteção. No entanto, o usuário pode usar uma rede treinada anteriormente e salva em arquivo para ser executada em tempo real.

A FANN tem um formato próprio para armazenar em arquivo a estrutura e peso sinápticos da RNA. Além disso, esse arquivo pode conter informação quanto a normalização dos dados de entrada e saída; deste modo, garante-se que os sinais de entrada e saída estão dentro dos limites utilizados no treinamento.

Esta classe não foi empregada diretamente no algoritmo de proteção proposto nesta tese no entanto, foi utilizada com sucesso em um trabalho paralelo (MONARO et al., 2012a).

4.2.7.2 Sub-classe *Fuzzy*

De maneira semelhante à classe *RNA*, a classe *Fuzzy* é derivada da classe *Measure*. O Apêndice C traz uma breve introdução aos sistemas *fuzzy*. O objetivo desta classe é a execução de um sistema de inferência *Fuzzy*, no qual as entradas provenientes dos canais serão convertidas em conjuntos *Fuzzy*. Os termos ativos destes conjuntos *Fuzzy* alimentam um sistema de regras que relacionam os termos dos conjuntos de entrada com os termos dos conjuntos de saída. Por fim, aplica-se um método de *defuzzificação* para obter um valor numérico de saída.

A etapa de *defuzzificação* é caracterizada por elevado custo computacional, especialmente quando se aplica a técnica de centro de área (PEDRYCZ, 1993). Apesar disso, com o *hardware* utilizado é possível executar, um sistema de inferência *fuzzy* em tempo real respeitando os requisitos de tempo do relé.

Para implementar os sistemas *fuzzy*, através da classe *Fuzzy*, usou-se a biblioteca *Fuzzylite* (RADA-VILELA, 2012). *Fuzzylite* é uma biblioteca GPL programada em C++. Ela suporta sistema de inferência Mandani e Takagi-Sugeno e tem estrutura orientada a objeto, que simplifica sua integração com a *OpenRelay*.

4.2.7.3 Sub-classe *Wavelet*

A TW aplica um par de filtros para decompor o sinal original em sub-bandas de frequência. De acordo com a sub-banda de interesse, aplica-se a TW recursivamente até que se alcance o nível ao qual a banda de frequência de interesse esteja evidente (VETTERLI; KOVAČEVIĆ, 1995).

A operação de convolução entre o filtro e o sinal é custosa computacionalmente. Usualmente quem aplica a TW em algoritmos de proteção realiza seus testes em ambiente de simulação, logo o tempo de processamento não é levado em conta. Como exemplo, a Figura 57 mostra um exemplo de decomposição. Neste, as sub-bandas de interesse estão contidas na aproximação A_2^2 do segundo nível e o detalhe D_3^2 do terceiro nível. Nestes casos, geralmente se aplica a transformada *Wavelet Packet*, que decompõe os sinais de baixa e alta frequência, formando uma árvore de decomposição bipartida. Para extrair os componentes de interesse, da maneira tradicional, são utilizadas sete transformações. Pode-se notar na figura que algumas transformações poderiam ser evitadas pois não há interesse nos seus produtos. Dado o número de operações desnecessárias e o compromisso em realizar esses cálculos em tempo real desenvolveu-se uma técnica de decomposição *Wavelet* seletiva.

A decomposição seletiva foi implementada pela sub-classe *Wavelet* derivada da classe *Measure*. O usuário fornece os componentes espectrais de interesse e o método *Prepare()* computa quais transformadas são necessárias para se obter os componentes de interesse e armazena a sequência mínima de operações para tal. O método *Run()* recebe o sinal

Figura 57 – Exemplo de Decomposição Seletiva Usando *Wavelet Packet*

de entrada de um canal e executa as operações previamente identificadas e armazena o resultado no canal de saída. Usando novamente a Figura 57 em azul estão destacadas as operações realizadas pela classe *Wavelet* para obter as mesmas sub-bandas. Foram necessárias três operações ao invés das sete originais. Deste modo, é possível executar TW em tempo real.

4.2.8 Classe *Protection*

A classe *Protection* é a classe da qual todas as classes dedicadas à execução de algoritmos de proteção derivam. Essas classes têm como entrada um ou mais canais de entrada analógico e/ou complexo e têm somente um canal de saída do tipo digital. É por meio deste canal que a função de proteção envia o sinal de disparo (*trip*). Foram implementadas as seguintes funções de proteção:

- ☐ Diferencial;
- ☐ Sobre(Sub)-corrente de tempo definido;
- ☐ Sobre(Sub)-tensão de tempo definido;
- ☐ Sub-frequência de tempo definido;
- ☐ Sobre(Sub)-corrente instantâneo;
- ☐ Sobre(Sub)-tensão instantâneo;
- ☐ Sobre(Sub)-corrente de tempo inverso;
- ☐ Sobre(Sub)-tensão de tempo inverso.

As curvas de tempo inverso disponíveis seguem os padrões IEEE (INSTITUTE of ELECTRICAL and ELECTRONICS ENGINEERS, 1997), *International Electrotechnical Commission* (IEC) (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 1976) e *Inverse Alternate Current* (IAC) (STANDARD, 1990 apud SIEMENS, 2000). As funções de proteção de sobrecorrente de tempo inverso são fruto do trabalho desenvolvido por Moro, Monaro e Vieira (2012).

4.2.9 Classe *Logic*

A proteção efetiva de um elemento do SEP é muitas vezes composta por diversas funções de proteção. Logo, é necessário compor a reposta de cada função de modo a garantir a atuação desejada do arranjo. Devido à natureza da saída (binária) pode-se utilizar operadores lógicos para realizar a composição.

É desta classe que todas as classes que têm como objetivo operações lógicas binárias derivam. Estas classes trabalham somente com canais do tipo digital. Todas as operações e funções lógicas implementadas estão listadas a seguir:

- ❑ Operador **Ou**;
- ❑ Operador **E**;
- ❑ Operador **Não**;
- ❑ Função **Borda de Subida**: Detecta a transição do nível lógico zero para um;
- ❑ Função **Borda de Descida**: Detecta a transição do nível lógico um para zero;
- ❑ Função **Contador**: Realiza contagens até um número pré-definido e aciona uma saída digital quando a contagem alcança seu limite;
- ❑ Função **Timer**: Aciona uma saída digital ao fim de um intervalo de tempo pré-determinado;
- ❑ Função **Flip-Flop**: Utilizado para armazenar estados digitais.

4.2.10 Classe *Oscilography*

A oscilografia consiste na medição de grandezas elétricas (principalmente de tensão e corrente) ao longo do tempo. Particularmente, uma taxa de amostragem adequada permite registrar fenômenos eletromagnéticos, como faltas em linhas de transmissão e em geradores. A oscilografia constitui uma etapa relativamente importante, porque é através dela que os sinais monitorados são registrados em um arquivo de dados, para posteriormente poderem ser estudados em detalhes, visando auxiliar na compreensão do que ocorreu durante aquele período de monitoramento.

Na biblioteca *OpenRelay* um canal digital dará início à oscilografia. As informações (canais) que serão salvas na oscilografia são de livre escolha. Além disso, o usuário pode definir o tamanho da oscilografia escolhendo a quantidade de ciclos de pré-falta e pós-falta que serão salvos.

Como já discutido anteriormente, a operação de gravação em disco é demasiadamente lenta, o que pode comprometer a execução em tempo real do programa. Assim a classe *Oscilography* tem duas etapas de execução distintas. A primeira etapa, de alta prioridade, trata do monitoramento do canal digital que dispara o início da oscilografia. Quando este canal muda seu estado, a classe começa a salvar em memória a quantidade dos dados indicados pelo número de ciclos solicitados. Quando esse total é atingido, a segunda etapa se inicia. Nesta etapa a classe cria uma *thread* de baixa prioridade que tem como objetivo transferir os dados em memória para o disco de armazenamento. Ao término da gravação em disco, a *thread* deixa de existir.

Assim, para cada evento de oscilografia cria-se uma nova *thread* de baixa prioridade, que será executada quando o fluxo principal do programa estiver no estado de espera. O estado de espera ocorre quando todas as listas de execução foram percorridas e o programa aguarda a interrupção de tempo para iniciar um novo ciclo.

4.2.11 Classe *Display*

Esta é a classe mais simples do *OpenRelay*, a qual tem o único fim de apresentar as informações que o usuário desejar visualizar em tela. Assim como a oscilografia, esta classe só possui uma relação de leitura, já que também neste caso apenas ocorre a leitura das informações contidas no(s) canal(is) solicitado(s) pelo usuário.

4.3 *Cubo PC104*

A biblioteca *OpenRelay* pode ser utilizada em qualquer computador que utilize o SO Linux. Caso deseje-se a execução desta em tempo real é necessário o uso do RTAI. Como um dos objetivos deste trabalho é avaliar profundamente o desempenho do algoritmo de proteção proposto, optou-se pelo teste embarcado em tempo-real. Para tanto, um conjunto de *hardware* capaz de executar, com baixa latência, algoritmos de proteção foi desenvolvido com o intuito de servir de plataforma para teste e avaliação de desempenho em laço fechado.

A plataforma desenvolvida foi batizada de *Cubo PC104*. Nesta seção serão discutidos os aspectos que levaram à escolha da plataforma PC104 (PC/104 Consortium, 2009), assim como os componentes selecionados para compor esta plataforma de testes.

4.3.1 A Plataforma PC104

PC104 ou PC/104 é um padrão de placas para computadores industriais controlado pelo PC104 Embedded Consortium (PC/104 Consortium, 2009) que define um padrão de formato e de barramento. PC/104 é destinado às aplicações de computação embarcada onde se depende de uma aquisição de dados confiáveis em ambientes extremos.

O formato PC104 foi originalmente concebido pela empresa Ampro, em 1987 e mais tarde padronizada pelo *PC/104 Consortium* em 1992. Uma tentativa de padronização correspondente ao PC104 pela IEEE foi feita com o IEEE P996.1, mas nunca foi ratificada.

4.3.1.1 Formato

Ao contrário dos modelos ATX, que utilizam barramento PCI e são utilizados na maioria dos *Personal Computers* (PCs), o padrão PC104 não tem plano de fixação e permite que seus módulos sejam empilhados juntos como blocos de construção. O empilhamento dos barramentos é mais robusto que as conexões de computadores pessoais, PCs. Isso é resultado de orifícios que ficam nos cantos dos módulos, permitindo que um seja fixado ao outro por meio de espaçadores.

O tamanho padrão das placas de acordo com as normas (Figura 58) é de 3,55 X 3,775 polegadas (90,7 mm X 95,89 mm), enquanto a altura é restrita normalmente pelo tamanho dos conectores. Essa restrição de altura é feita para que cada módulo não interfira com seu vizinho, embora haja módulos comerciais que muitas vezes não respeitam o padrão.

Figura 58 – Vista e Dimensões de Módulos PC104

4.3.1.2 Vantagens do uso da Plataforma PC104

Conforme foi mencionado anteriormente, a plataforma PC104 permite a implementação de computação embarcada em ambientes industriais, isso se deve às seguintes características: formato reduzido, permitindo assim menor área para danos; a possibilidade

sistemas sem partes móveis ao utilizar discos de armazenamento de estado sólido e sistema de refrigeração *fanless* (utiliza somente dissipador).

Além dessas características que provêm robustez à plataforma, esta permite o uso de sistemas operacionais convencionais, provendo assim flexibilidade no seu uso. Ainda é possível a utilização de sistemas operacionais de tempo real para suprir a necessidade de aplicações de controle que têm requisitos de tempo. Tais características fazem da plataforma PC104 uma excelente base de desenvolvimento para aplicações industriais, pois une robustez com flexibilidade. Assim, pode-se utilizar o conjunto descrito como uma plataforma de desenvolvimento de funções de proteção, com forte atenção nos algoritmos de proteção, sem a dependência de conhecimentos profundos da arquitetura do *hardware*.

4.3.2 Composição do *Cubo PC104*

O diagrama de blocos da Figura 59 mostra uma visão geral das principais partes do *hardware* e suas inter-relações.

Figura 59 – Visão do Conjunto

Figura 60 – Principais Subsistemas de um Relé Digital.

Esse arranjo foi inspirado na arquitetura encontrada em relé digitais comerciais, que é mostrada de forma sintética na Figura 60 (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI, 2007). Observa-se que as tarefas dos subsistemas de condicionamento, conversão e processamento no relé são executadas, nesta abordagem, pela UCS (é a mesma mostrada na seção 3.2.4.2), PAD e placa de processamento.

O conjunto de placas que compõem o *Cubo PC104* conta com uma placa de processamento de dados, uma placa de aquisição de dados e uma fonte de energia. A placa de processamento de dados escolhida tem como característica:

- ❑ Processador AMD Geode LX800 (arquitetura x86);
- ❑ 512 MB de Memória RAM DDR333;
- ❑ 1 GB de Armazenamento em Cartão *Compact Flash* (CF);
- ❑ 1 Placa de rede *Ethernet* 10/100 Mb/s;
- ❑ 4 Portas USB 2.0;
- ❑ 2 Portas Seriais (RS232);
- ❑ 1 Porta Paralela.

A escolha da placa de aquisição de dados baseou-se no número de canais de entrada analógica, na taxa de amostragem máxima e na disponibilidade do *driver* desta placa no Comedi. A placa escolhida tem como principais características:

- ❑ Resolução de 16 *bits*;
- ❑ Taxa de amostragem máxima de 100 kS/s;
- ❑ 16 Canais de entrada analógica em modo comum ou 8 em modo diferencial;
- ❑ 8 Canais de entrada/saída digital;
- ❑ *Buffer* de 512 amostras.

Como módulo de energia utilizou-se um modelo que possui as seguintes propriedades:

- ❑ Potência de saída de 50 W;
- ❑ Tensão de entrada variável entre 6 V e 40 V;
- ❑ Saídas ± 5 V e ± 12 V.

A Figura 61 mostra o conjunto de placas PC/104 montadas em um gabinete, com suas dimensões físicas, apelidado de *Cubo PC104*, desenvolvido e confeccionado no Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica (LSEE) do Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação da EESC-USP.

Figura 61 – Cubo PC104

4.4 Avaliação do Funcionamento do *Cubo PC104* e da Biblioteca *OpenRelay*

Nesta seção são mostrados os testes realizados para avaliar o desempenho da Biblioteca *OpenRelay* em testes embarcados no *Cubo PC104*. Foram observados a precisão da taxa de amostragem e o tempo de processamento da aquisição, medição e proteção. Os testes foram conduzidos para duas taxas de amostragem, sendo 8 e 16 amostras por ciclo de 60 Hz. Um SEP simulado por meio do ATP (1987) forneceu dados sobre a operação de um GS submetido a faltas internas e faltas externas. As faltas internas foram aplicadas nos terminais do GS mas dentro da zona de atuação das proteções. Foram testadas funções de proteção diferencial, sobrecorrente de fase e sobrecorrente de neutro. Os resultados da atuação das funções de proteção foram comparados aos resultados obtidos de um relé comercial submetido aos mesmos testes.

4.4.1 O Sistema Elétrico Analisado

A Figura 62 mostra a representação do sistema elétrico utilizado nas simulações para fornecer dados para o teste dos algoritmos de proteção e da plataforma.

O sistema elétrico é composto por um gerador síncrono de 13,8 kV e potência aparente de 90 MVA, transformadores elevadores com relações de 13,8/138 kV e potência aparente de 25 MVA, linhas de transmissão com extensões variando entre 80 e 150 km, transformadores abaixadores similares aos elevadores e cargas caracterizadas por fator de potência de 0,92 indutivo e potência aparente variando entre 5 e 25 MVA. Este sistema foi desenvolvido no LSEE e já foi empregado em outros trabalhos (BARBOSA et al., 2007; BARBOSA et al., 2008).

Figura 63 – Funções de Proteção e Lógica de Atuação

Tabela 39 – Parâmetros da Proteção de Sobrecorrente de Fase Instantânea

<i>Pick-Up</i>
1, 15 pu

Tabela 40 – Parâmetros da Proteção de Sobrecorrente de Neutro

<i>Pick-Up</i>	<i>Dial</i>	Família de Curva
0, 4 pu	4, 0	IEEE Very Inverse

componente. Isso inviabilizaria os testes da proteção diferencial. Contudo, empregou-se um arranjo de TCs, descrito na Figura 64(b), que possibilita a simulação de faltas internas nos terminais do GS. É importante esclarecer que mesmo com a limitação do ATP, as correntes que passam por *TC1* e *TC2*, para o caso de uma falta interna, são as mesmas nas Figuras 64(a) e 64(b), não tendo prejuízos nas simulações executadas. O mesmo se observa para o caso de uma falta externa (Figuras 64(c) e 64(d)).

Apesar da análise feita na Figura 64 trazer o caso de falta fase-terra, esse esquema também é válido para faltas fase-fase e trifásicas que ocorram nos terminais do GS.

4.4.2.1 Teste do Conjunto

Utilizando a plataforma PC104, os algoritmos de proteção discutidos na seção 4.4.2 foram embarcados e posteriormente testados com auxílio de uma caixa de geração de

Figura 64 – Disposição dos TCs para proteção diferencial

sinais elétricos. Esta é um sistema de alta potência que pode gerar sinais elétricos a partir de arquivos de simulações, podendo ser utilizada para testar desde os antigos relés eletromecânicos aos modernos relés equipados com microprocessadores.

Alimentando a caixa com as oscilografias obtidas na simulação do sistema elétrico proposto, usando o ATP, pretendeu-se avaliar a confiabilidade e desempenho dos algoritmos em tempo real de execução, mostrando assim sua potencial aplicação em campo. O teste proposto se encontra na Figura 65.

Figura 65 – Teste Embarcado em Plataforma PC104

4.4.2.2 Teste do Relé Comercial

A título de comparação de desempenho das funções de proteção implementadas, um relé comercial foi ensaiado. No relé em questão foram habilitadas as funções de proteção discutidas na seção 4.4.2 e os parâmetros de ajuste foram os mesmos utilizados no teste da plataforma PC104. A Figura 66 mostra a estrutura do ensaio em laboratório do relé comercial.

Figura 66 – Teste do Relé Comercial

4.4.3 Resultados

Nos testes realizados usando o Cubo PC104 foram avaliados a correta atuação das funções de proteção, o tempo de execução de cada etapa do algoritmo e a precisão da taxa de amostragem. Nesta análise duas taxas de amostragem, 8 e 16 amostras por ciclo de 60 Hz, foram utilizadas nos testes realizados.

4.4.3.1 Tempo de Processamento

Um dos critérios de avaliação do desempenho da plataforma de teste proposta é a capacidade de processamento, ou seja, o tempo gasto para realizar a aquisição dos sinais de entrada, pré-processá-los e por fim, executar a função de proteção. Lembrando que o tempo disponível para a execução dessas tarefas é o intervalo de tempo entre amostragens. Caso esse critério não seja atendido, ocorrerá a perda de informação com prejuízo à confiabilidade da função de proteção.

A Figura 67 mostra a execução das etapas do algoritmo ao longo do tempo, na qual $T(k)$ denota o tempo em que ocorrem as interrupções periódicas, $T_a(k)$, $T_m(k)$ e $T_p(k)$ indicam o fim das etapas de aquisição, medição e proteção, respectivamente. A avaliação do tempo de execução busca evidenciar a utilização do tempo de processamento disponível de cada bloco do algoritmo em execução. Para calcular o tempo de execução da etapa de aquisição (T_{acq}), medição (T_{mea}) e proteção (T_{pro}) foram utilizadas as Equações 5, 6 e 7,

Figura 67 – Tempo de Execução dos Algoritmos de Proteção

nessa mesma ordem, nas quais k indica a k -ésima execução do algoritmo. Para o cálculo do tempo de inatividade (T_{idl}) utilizou-se a Fórmula 8. É importante salientar que T_{idl} deve ser maior que zero, pois é neste intervalo de tempo que os demais processos de baixa prioridade do SO são executados. Além disso, o tempo de inatividade nulo indica que a placa de processamento não consegue executar a tarefa solicitada em tempo real. Ressalta-se que o tempo gasto pelas instruções que realizam as medições de tempo foi desconsiderado.

$$T_{acq}(k) = T_a(k) - T(k) \quad (5)$$

$$T_{mea}(k) = T_m(k) - T_a(k) \quad (6)$$

$$T_{pro}(k) = T_p(k) - T_m(k) \quad (7)$$

$$T_{idl}(k) = T(k+1) - T_p(k) \quad (8)$$

Para realizar essa avaliação foram medidos os tempos de execução das etapas do algoritmo durante um intervalo de um minuto. Durante este tempo a plataforma foi alimentada por oscilografias obtidas do SEP simulado em situações de operação em regime permanente e de falta, buscando identificar alguma mudança significativa nos tempos de execução das etapas dos algoritmos de proteção em diversas situações de operação.

As Tabelas 41, 42 e 43 mostram, respectivamente, os tempos de execução das etapas de aquisição, medição e proteção, para o intervalo observado. Constata-se que os tempos de execução se mantiveram praticamente constantes e com baixa variação.

Tabela 41 – Tempo de Execução da Etapa de Aquisição

Amostras por Ciclo	8	16
Médio (μs)	159,892	159,912
Variância (μs^2)	0,222	0,277
Máximo (μs)	177,625	174,458
Mínimo (μs)	158,514	158,359

Os gráficos das Figuras 68(a) e 68(b) buscam destacar o tempo gasto na execução de cada etapa do algoritmo frente ao tempo total disponível para o processamento. Observa-se que o tempo de execução das funções de proteção utilizadas como exemplo foi bem inferior ao tempo máximo permitido, possibilitando desta maneira, o teste de funções de

Tabela 42 – Tempo de Execução da Etapa de Medição

Amostras por Ciclo	8	16
Médio (μs)	94,252	173,485
Variância (μs^2)	0,0696	0,174
Máximo (μs)	103,125	182,812
Mínimo (μs)	93,655	172,256

Tabela 43 – Tempo de Execução da Etapa de Proteção

Amostras por Ciclo	8	16
Médio (μs)	25,586	25,476
Variância (μs^2)	0,065	0,069
Máximo (μs)	35,061	34,728
Mínimo (μs)	25,032	24,956

proteções mais complexas, que exijam mais cálculos. Algo a ser notado é que o tempo

Figura 68 – Tempo de Execução

médio gasto pela aquisição e proteção foram praticamente iguais para as duas taxas de amostragens utilizadas (Tabelas 41 e 43). No entanto, o percentual de processamento destacado para essas atividades dobrou quando foram consideradas 16 amostras por ciclo. Isso ocorre porque o tempo total disponível quando se utiliza a taxa de 16 amostras por ciclo é metade do tempo disponível para a taxa de 8 amostras por ciclo.

Outra constatação é que o tempo dedicado à medição quadruplicou percentualmente. Como a taxa de amostragem duplicou, o tempo disponível ao processamento entre duas amostras consecutivas caiu pela metade. Além disso, dada a nova taxa de amostragem o número de amostras que representam um ciclo de forma de onda também aumentou. Deste modo, o número de operações aritméticas para o cálculo dos fasores e dos valores eficazes dobrou. Portanto, o aumento do número de operações aritméticas aliada à diminuição do tempo disponível para tais cálculos elevou a participação percentual da etapa de medição no total de tempo disponível para o processamento de todas as etapas.

4.4.3.2 Precisão da Taxa de Amostragem

Outro critério para avaliar o desempenho da plataforma de teste proposta foi a precisão da taxa de amostragem dos sinais de entrada. Uma vez que a taxa de amostragem é controlada pelo programa, é importante verificar sua precisão e desvio máximo. Esta preocupação justifica-se pelo fato que, se a taxa de amostragem não for constante, devido à latência, os sinais de entrada não serão amostrados coerentemente, levando a erros de medição e por consequência à atuação errônea das funções de proteção. Como exemplo, pode-se citar o espalhamento espectral na TDF (BAGHZOUZ et al., 1998). A medição do intervalo de amostragem utilizou a Equação 9. Para tal, a taxa de amostragem foi medida em um intervalo de um minuto de execução do algoritmo de proteção, durante o qual a plataforma foi alimentada por oscilografias obtidas do SEP simulado em situações de operação em regime permanente e de falta, buscando evidenciar eventuais variações na taxa de amostragem devido à mudança no regime de operação da SEP simulado.

$$T_{smp}(k) = T(k+1) - T(k) \quad (9)$$

A Tabela 44 mostra os resultados obtidos para as duas taxas de amostragem investigadas, 8 e 16 amostras por ciclo de 60 Hz, ou seja, 2083,33 μs e 1041,66 μs respectivamente. Observa-se que o erro médio foi baixo, assim como, o erro máximo. A partir do histograma da Figura 69(a), que traz a dispersão do erro da taxa de amostragem, pode-se observar que 90% das amostras têm erro inferior a 1,25 μs (0,06%) para a taxa de amostragem de 8 amostras por ciclo. Com auxílio do histograma da Figura 69(b), que mostra a dispersão do erro da taxa de amostragem para o caso que se usou a taxa de 16 amostras por ciclo, constata-se que 90% das amostras têm erro menor que 1,23 μs (0,11%).

Tabela 44 – Precisão da Taxa de Amostragem

Amostras por Ciclo	8	16
Erro Absoluto Médio (μs)	0,607	0,543
Erro Relativo Médio (%)	0,058	0,052
Variância (μs^2)	0,295	0,266
Erro Absoluto Máximo (μs)	11,882	9,817
Erro Relativo Máximo (%)	1,140	0,942

4.4.3.3 Desempenho da Função de Proteção Teste

Os gráficos das Figuras 70 e 71 mostram, respectivamente, a resposta da plataforma de teste e do relé comercial para uma situação de falta entre a fase C do gerador e a terra dentro da área de proteção da proteção diferencial do gerador, mostrada na Figura 63.

Os gráficos das Figuras 72 e 73 mostram, respectivamente, a resposta da plataforma de teste e do relé comercial para uma situação de falta entre a fase A e a fase B do gerador dentro da área de proteção da proteção diferencial.

Figura 69 – Dispersão do Erro de Amostragem

Figura 70 – Resposta das Funções de Proteção (Falta C-Terra) *Cubo PC104*

O sub-índice t indica as correntes dos TCs próximos aos terminais dos geradores e o sub-índice n discrimina as correntes dos TCs próximos ao neutro do gerador. Por fim, a corrente de neutro é assinalada por i_n . Na parte inferior dos gráficos têm-se as saídas lógicas de todas as funções de proteção e das lógicas de disparo e alarme implementadas, na qual a linha cheia indica o estado ativo. Como o tempo de atuação da função de sobrecorrente de neutro é muito longo, optou-se por indicar somente o instante da partida desta função nos gráficos analisados. Pela análise comparativa dos gráficos, conclui-se que as funções de proteção embarcadas no PC104 atuaram corretamente.

Figura 71 – Resposta das Funções de Proteção (Falta C-Terra) *Relé Comercial*

Figura 72 – Resposta das Funções de Proteção (Falta A-B) *Cubo PC104*

Figura 73 – Resposta das Funções de Proteção (Falta A-B) *Relé Comercial*

Uma segunda análise foi feita no que diz respeito ao tempo de atuação. As Tabelas 45 e 46 mostram os tempos de atuação das funções de proteção embarcadas no PC104 e as funções ativadas no relé comercial para as situações de faltas indicadas anteriormente. Com base nestas, confirma-se o correto funcionamento dos algoritmos implementados. Pequenas diferenças no tempo de atuação podem ser observadas, isso se deve, provavelmente, à maneira que o algoritmo foi implementado pelo fabricante do relé comercial, como por exemplo, a maneira que são realizados os cálculos dos fasores ou quantas amostras são utilizadas para confirmar o evento de proteção. Enfatiza-se que essas informações não estão disponíveis para consulta, uma vez que constituem parte do segredo industrial da empresa.

Este capítulo mostrou o desenvolvimento e avaliação de desempenho de um sistema integrado de *hardware* e *software* para desenvolver e executar, em tempo real, funções de proteção aplicadas em sistemas elétricos. Uma das principais vantagens do sistema proposto é facilitar a programação das funções de proteção, uma vez que não exige o conhecimento detalhado de sua arquitetura, tampouco de linguagens de programação de baixo nível. Além disso, a execução em tempo real e implementação em *hardware* são fundamentais para avaliar a viabilidade de implementação de novos algoritmos de proteção em condições próximas às encontradas em casos práticos.

A avaliação da precisão da taxa de amostragem mostrou que o uso do RTAI é viável em aplicações de tempo crítico como proteção. A placa de processamento foi capaz de

Tabela 45 – Tempos de Atuação (Falta C-Terra)

Função de Proteção	Tempo de Atuação (ms)	
	PC104	Relé Comercial
87G-A	†	†
87G-B	†	†
87G-C	2,13	2,09
50-A	†	†
50-B	11,44	14,55
50-C	8,30	8,27
51G-A	0,92	2,09

† Não houve atuação.

Tabela 46 – Tempos de Atuação (Falta A-B)

Função de Proteção	Tempo de Atuação (ms)	
	PC104	Relé Comercial
87G-A	2,22	2,28
87G-B	2,22	2,28
87G-C	†	†
50-A	7,49	6,18
50-B	7,49	6,18
50-C	†	†
51G-A	†	†

† Não houve atuação.

executar os algoritmos de proteção com rapidez aceitável, o que mostra a possibilidade do uso desta para executar funções de proteção mais complexas. Conclui-se que o sistema desenvolvido neste trabalho atendeu a todos os requisitos de funcionamento examinados, destacando-se como uma importante ferramenta para auxiliar o desenvolvimento de novas técnicas de proteção, diminuindo o tempo de implementação e possibilitando testes mais completos. Ressalta-se que o emprego de funções de proteção tradicionais foi útil para validar os resultados do sistema proposto.

Destaca-se que o sistema composto pelo *Cubo PC104* e pela biblioteca *OpenRelay* foi empregado nos testes embarcados em tempo-real (seção 5.3) realizados para mostrar a factibilidade do uso da técnica proposta na prática.

Proteção Inteligente de Geradores Síncronos

Neste capítulo é apresentado o algoritmo de proteção inteligente que busca a melhoria da proteção de GSs. Primeiramente, uma revisão bibliográfica apresenta as principais técnicas utilizadas na proteção dos enrolamentos de armadura de GS e os trabalhos mais relevantes publicados sobre o assunto na comunidade científica especializada. Em seguida, apresenta-se um arranjo composto por funções de proteção tradicionais mais utilizadas em situações reais, com o objetivo de servir como base de comparação de desempenho para o esquema de proteção inteligente desenvolvido. Após, o esquema de proteção inteligente, baseado em Lógica *Fuzzy* (PEDRYCZ, 1993), é apresentado em detalhes. Por fim, os resultados obtidos nos testes da proteção inteligente são mostrados.

5.1 Revisão Bibliográfica

A seguir apresenta-se uma revisão bibliográfica dos trabalhos mais recentes e relevantes que tratam da proteção de GSs, mais especificamente na proteção da armadura destas máquinas. O levantamento bibliográfico a respeito da proteção do estator de GSs foi subdividido de acordo com a filosofia de proteção empregada: proteção diferencial, contra faltas fase-terra e contra faltas entre espiras.

5.1.1 Proteção Diferencial

A proteção diferencial é o método mais utilizado na proteção dos enrolamentos de estator da máquina síncrona. Esta filosofia de proteção emprega dois TCs por fase, cada um ligado em uma das extremidades dos enrolamentos de armadura. Um relé diferencial compara continuamente as correntes que entram e saem dos enrolamentos. Em condições normais de operação essas correntes não diferem. Porém, em casos de falta dentro da

zona de proteção definida pelos TCs, as correntes serão diferentes, sensibilizando o relé e ativando desta maneira a proteção.

Apesar deste método ser muito empregado ele possui certas limitações, como:

- ❑ A influência da corrente de carga nos ajustes das curvas de proteção. A corrente de carga contribui com a corrente de restrição do relé diferencial, aumentando a corrente de operação necessária para sensibilizar o relé e diminuindo desta maneira a sensibilidade da proteção diferencial (REIMERT, 2006);
- ❑ Não detecção de faltas entre espiras, pois nesse tipo de falta a corrente que entra e sai do enrolamento em falta será a mesma (REIMERT, 2006);
- ❑ Sofre influência do método de aterramento na proteção contra faltas fase-terra: para aterramentos de alta impedância a porção do enrolamento próxima ao neutro estará desprotegida (INSTITUTE of ELECTRICAL and ELECTRONICS ENGINEERS, 2006b);
- ❑ Em situações de faltas severas, os TCs podem sofrer saturação, causando a má operação da proteção diferencial (KASZTENNY; FINNEY, 2005).

Visando superar uma ou mais das limitações mencionadas anteriormente, encontram-se na literatura técnica algumas propostas, conforme abordado a seguir.

Megahed e Malik (1999) descrevem um novo esquema de proteção diferencial dos enrolamentos do estator de geradores baseado em RNA. O esquema inclui duas RNAs do tipo *feedforward* (BRAGA; FERREIRA; LUDERMIR, 2000). Uma RNA é usada para detecção de faltas e outra para classificação entre falta interna e externa. Esse esquema usa as correntes de entrada e saída de cada enrolamento conjuntamente com a corrente de campo do GS. Os componentes fundamentais das correntes de armadura e de segunda harmônica presentes na corrente de campo auxiliam a detecção de faltas e na classificação dos possíveis estados de operação: normal, falta externa e falta interna. Os autores destacam que a identificação é rápida, entre 1,7 e 4,2 milissegundos, das condições de falta. No entanto, os autores não destacam a área de cobertura para faltas fase-terra do esquema proposto e também não é abordada a resposta do algoritmo para faltas entre-espiras e entre-caminhos.

O trabalho de Darwish, Taalab e Kawady (2001) analisa o uso de diversas topologias de RNAs para detecção de faltas em GSs. Adicionalmente, as RNAs classificam o tipo da falta e as fases envolvidas. Para isso, as RNAs recebem informações das correntes nos terminais e neutro do GS, configurando desta forma uma espécie de proteção diferencial. Os autores afirmam que o esquema proposto tem alta sensibilidade e estabilidade. Como parte dos resultados, eles apresentam um teste embarcado em um DSP do esquema desenvolvido. Os autores relatam que o esquema proposto é capaz de identificar faltas fase-terra que ocorram a apenas 0,3% do neutro, no entanto, não é discutido a seletividade do método, ou seja, se capacidade de identificar esse tipo de defeito é está condicionada à coordenação

com as outras proteções do SEP. Outro ponto que precisa ser analisado é o modelo numérico empregado para a obtenção de dados de faltas no GS considerado. De acordo com os autores o modelo numérico para simular o GS é o mesmo usado por Taalab, Darwish e Kawady (1999), considera que faltas fase-terra podem ser simuladas através de divisão proporcional da indutância e da tensão contra-eletromotriz do enrolamento de armadura entre o ponto de falta, o neutro e o terminal do GS. Essa consideração negligencia o acoplamento elétrico entre as fases comprometendo a qualidade dos sinais simulados e consequentemente as análises do esquema de proteção apresentado.

Jiajie, Nengling e Chen (2007) propõem um algoritmo de proteção diferencial modificado. A principal diferença no algoritmo proposto é o cálculo da corrente de restrição. Os autores usam dois métodos de cálculo. O primeiro torna a proteção diferencial mais sensível, no entanto menos seletiva especialmente na ocorrência de saturação dos TCs durante faltas externas. O segundo privilegia a seletividade em detrimento da sensibilidade. A decisão sobre qual método de cálculo da corrente de restrição deve ser usado é tomada pela identificação se a falta é externa ou interna. Essa identificação utiliza uma *phaselet* de um quarto de ciclo para distinção entre falta externa e interna, pois de acordo com os autores um TC não satura no primeiro quarto de ciclo de uma falta externa ou interna. Como o método proposto é inspirado na proteção diferencial convencional este não é capaz de identificar faltas entre-espiras e entre-caminhos. Os autores não discutem o quanto o método de cálculo da corrente de restrição melhora a área de cobertura da proteção diferencial para faltas fase-terra.

5.1.2 Proteção Contra Faltas Fase-Terra

Caso os geradores possuam aterramento de alta impedância é necessária uma função complementar para proteger a porção do enrolamento não protegida pela proteção diferencial. O esquema de proteção mais empregado é o que monitora a tensão de sequência zero sobre a impedância de aterramento. Faltas fase-terra causam o aumento da corrente de sequência zero que passa pela impedância de aterramento. Assim um relé de sobretensão sensível a sequência zero dispara a proteção do gerador.

Uma falha no esquema de proteção contra faltas fase-terra mencionado anteriormente é que este não protege 100% do enrolamento de estator. Este esquema detecta faltas em aproximadamente 95% do enrolamento e os 5% restantes, próximos ao neutro, ficam desprotegidos. Até o fim dos anos 70 a ausência de proteção nesta porção do enrolamento não era considerada um problema, pois pensava-se que um defeito nesta parte dos enrolamentos não causaria danos significativos. No entanto, a experiência tem mostrado que faltas danosas podem ocorrer em porções do enrolamento próximas ao neutro (POPE, 1984).

Outra consideração é que uma falta no final do enrolamento, próximo ao neutro, faz com que a impedância de aterramento e o relé de proteção de faltas fase-terra sejam

curto-circuitados. Se uma segunda falta ocorrer na mesma fase próximo aos terminais do gerador, esta não será detectada ou mesmo restringida pela impedância de aterramento. A proteção diferencial também pode falhar visto que as correntes nas extremidades do enrolamento podem ser iguais. Essa falta de alta magnitude persistirá até que a falta envolva outra fase, e assim seja detectada pela proteção diferencial (REIMERT, 2006).

Como resultado destas considerações, diversos esquemas para proteção da totalidade do enrolamento de armadura têm sido estudados. No fim dos anos 70, Stein e Linders (apud GRIFFIN; POPE, 1982) apresentaram um relé de subtensão de terceiro harmônico de neutro (27TN) que, em conjunto com a proteção tradicional de sobretensão de 60 Hz (59G), proporciona a proteção completa do enrolamento do estator. Sabe-se que, devido à forma dos enrolamentos da armadura, os GSs em condições normais podem gerar tensões de terceiro harmônico em seus terminais e no neutro. No entanto, constata-se que na maioria dos GSs durante uma situação de falta próxima ao neutro observa-se um decréscimo da tensão de terceiro harmônico produzida. O contrário se observa na tensão de terceiro harmônico nos terminais que durante uma falta próxima ao neutro se eleva. Deste modo, este esquema de proteção poderá ser aplicado se a redução da tensão de terceiro harmônico de neutro do gerador durante uma falta for significativa.

No entanto, de acordo com Fulczyk e Mydlikowski (2005) a tensão de terceiro harmônico produzida pelo gerador sofre grande influência da potência ativa e reativa que o mesmo está fornecendo, forçando a diminuição da sensibilidade da proteção proposta por Stein e Linders (1977). Buscando superar essa deficiência, um segundo esquema foi desenvolvido por Schlake, Buckley e Mcpherson (1981). Esse esquema compara as tensões de terceiro harmônico produzidas no neutro e nos terminais do gerador, diminuindo a influência do carregamento do gerador na sensibilidade da proteção. Ele requer transformadores de potencial com os primários fechados em estrela e os secundários fechados em delta aberto para medir o valor da tensão do terceiro harmônico nos terminais do gerador. O custo adicional associado e a complexidade de conexão reduzem o emprego deste esquema.

Yin et al. (1990) desenvolveram um esquema adaptativo que compara as tensões de terceiro harmônico produzidas no neutro e nos terminais do gerador. Esta técnica está baseada na taxa de variação da razão entre as tensões de terceiro harmônico dos terminais e do neutro do gerador. Durante mudanças de carga e oscilações de potência a taxa de variação será muito menor que em condições de falta fase-terra. Esse arranjo é mais sensível que os abordados anteriormente.

Guopei et al. (2000) desenvolveram um esquema de proteção empregando a TW para detectar faltas fase-fase, fase-terra e falta entre espiras. Este esquema monitora a tensão de sequência zero e de terceiro harmônico empregando análise multi-resolução da TW. No entanto, a detecção de faltas entre espiras somente será efetiva em enrolamentos com um caminho por fase, visto que faltas entre espiras de um único caminho, em máquinas com

mais de um caminho por fase, não necessariamente causam o aparecimento de sequência zero nos terminais do GS. O emprego de TW garante a este esquema uma maior imunidade contra variações de frequência, uma vez que, os detalhes e aproximações da TW contém informações de um intervalo de frequências diferentemente da Transformada de Fourier (TF) que contém informação de apenas de uma raia de frequência.

O valor da tensão de terceiro harmônico que está presente em um dado gerador depende de inúmeros fatores. Um desses fatores é o passo dos enrolamentos de estator (como os enrolamentos estão dispostos no estator), fundamental na determinação da quantidade de terceiro harmônico. Existem geradores que apresentam pequena quantidade de terceiro harmônico, logo os esquemas citados anteriormente não podem ser empregados.

Outro aspecto é a potência ativa e a reativa fornecida pelo gerador. O terceiro harmônico geralmente aumenta com o aumento da carga ativa do gerador. Em condições de baixa carga, o terceiro harmônico é geralmente baixo que não possibilita um ajuste confiável do relé. A potência reativa também afeta o terceiro harmônico e é ainda mais imprevisível. Em alguns casos ela aumenta com aumento da carga reativa, em outros há uma queda abrupta em um valor específico de potência reativa, tornando os esquemas citados anteriormente imprecisos (FULCZYK; MYDLIKOWSKI, 2005). Assim, fica evidente a dificuldade de ajustar a sensibilidade da proteção contra faltas fase-terra baseadas na medição de terceiro harmônico.

Uma alternativa aos esquemas que empregam o terceiro harmônico é discutida por Pope (1984). Esse esquema injeta uma frequência sub-harmônica nos enrolamentos do estator do gerador. A frequência injetada varia entre 15 e 20Hz. O sinal é injetado através do transformador de aterramento. A carga do injetor de sinal é a capacitância dos enrolamentos. Em condições normais de operação o injetor irá fornecer uma baixa corrente às capacitâncias. Quando uma falta ocorrer, a capacitância será curto-circuitada aumentando a corrente fornecida pelo injetor, sensibilizando um relé de sobrecorrente. Esse esquema pode detectar uma falta fase-terra enquanto o gerador está desligado, no entanto, seu maior problema é o custo dos injetores e dos filtros associados.

É importante salientar que todos os esquemas para proteção de faltas fase-terra apresentados devem ter sua atuação temporizada. Primeiramente, porque para faltas externas do tipo fase-terra a contribuição do GS para a corrente de falta circula pelo neutro do mesmo. Isso causa o aparecimento de uma tensão no neutro, sensibilizando a proteção de sobre-tensão ou sobre-corrente de neutro. O mesmo cuidado deve ser tomado para as proteções que usam a componente de terceiro harmônico pois faltas próximas aos terminais do GS mas fora de sua zona de proteção podem modificar a tensão de terceiro harmônico produzido pelo GS. Deste modo é necessária a temporização destas funções de proteção para que se mantenha a coordenação com a proteção dos outros equipamentos do SEP. O atraso empregado na atuação destas funções pode variar de algumas centenas de milissegundos até alguns minutos (INSTITUTE of ELECTRICAL and ELECTRONICS ENGINEERS,

2006a).

5.1.3 Proteção Contra Faltas Entre-espiras

Falhas na isolação dos enrolamentos em máquinas elétricas levam a faltas entre espiras. No intervalo entre um terço de segundo a alguns minutos, a falta entre espiras pode evoluir para tipos de faltas mais severas tais como faltas fase-terra, fase-fase ou trifásicas. Logo, para suprir a deficiência da proteção diferencial na proteção contra faltas entre espiras, empregam-se funções de proteção complementares.

Em geradores que possuem dois ou mais circuitos paralelos ou caminhos por fase, as correntes que circulam por cada um dos circuitos devem ser aproximadamente iguais em condições normais de operação. No caso de uma falta entre espiras em algum dos ramos (caminhos), a corrente que percorre os conjuntos será distinta. Medindo-se a diferença de corrente dos ramos, pode-se proteger os enrolamentos do estator contra faltas entre espiras (INSTITUTE of ELECTRICAL and ELECTRONICS ENGINEERS, 2006b).

Para geradores que não possuem múltiplos circuitos por fase, pode-se detectar faltas entre espiras pelo desbalanço de tensão. Empregam-se três TPs ligados em estrela no primário com o ponto neutro ligado diretamente ao neutro do gerador e secundário ligado em delta aberto, possibilitando a medição do desbalanço de tensão. Caso o desbalanço de tensão supere o valor pré-determinado, um relé de sobretensão detecta a falta (INSTITUTE of ELECTRICAL and ELECTRONICS ENGINEERS, 2006b). Esse esquema pode atuar indevidamente, caso as cargas sejam demasiadamente desbalanceadas, limitando desta maneira sua sensibilidade.

Penman e Jiang (1996) propõem um método inovador que observa os componentes harmônicos presentes na corrente de excitação, com o intuito de detectar faltas entre espiras nos enrolamentos do rotor e estator. A metodologia empregada é amparada por resultados experimentais. Observou-se que a magnitude das componentes harmônicas sofre mudanças em condições de faltas entre espiras em comparação à condição de operação normal, com destaque da componente de 400 Hz. No entanto, os autores não discutem o motivo desse comportamento e se o mesmo pode ser extrapolado para outras máquinas síncronas.

Esta revisão bibliográfica apresentou um panorama geral sobre algumas das principais abordagens propostas para a proteção de GSs, considerando as diversas técnicas existentes. Todavia, observa-se a existência de determinadas limitações na detecção de faltas fase-terra que ocorram próximo ao terminal neutro, faltas entre-espiras e a faltas entre-caminhos. Os trabalhos que abordam a identificação de faltas fase-terra não trataram a influência da resistência de aterramento e carregamento dos GSs. Constata-se poucos trabalhos que abordem a detecção e faltas entre-espiras e entre-caminhos. Entre todos os trabalhos consultados constata-se que a maioria utilizam dados de simulação para validar o funcionamento das técnicas propostas. Outra constatação foi a ausência de trabalhos

que empreguem LF. Neste contexto, a técnica de proteção *fuzzy* proposta neste trabalho usa dados obtidos através de simulações e de um extenso conjunto de oscilografias obtidas em ensaios de faltas aplicadas em GSs reais. O esquema proposto busca a melhoria da área de cobertura da detecção de faltas fase-terra e a identificação de faltas entre-espiras e entre-caminhos.

5.2 Sistema *Fuzzy* para Proteção de Geradores Síncronos

O sistema *Fuzzy* para a proteção de GSs proposto neste trabalho foi separado em dois sub-sistemas distintos. A Figura 74 mostra uma visão geral do sistema *fuzzy* desenvolvido. Nesta figura destacam-se quatro blocos funcionais:

- ❑ *Aquisição de dados*: Neste bloco realiza-se a medição dos sinais que alimentam o bloco seguinte. Este compreende o condicionamento, amostragem, discretização dos sinais;
- ❑ *Pré-Processamento*: A função deste bloco é o cálculo das variáveis de entrada para sistema fuzzy. As variáveis de entrada do sistema *fuzzy* são derivadas dos sinais disponibilizados na etapa de aquisição de dados. Estas variáveis foram selecionadas pelo método de mineração de dados feita nas oscilografias de faltas obtidas;
- ❑ *Sistema Fuzzy*: Este é o bloco principal do esquema de proteção desenvolvido neste trabalho. O sistema *fuzzy* é sub-dividido em dois blocos:
 - Sub-sistema *fuzzy* instantâneo: Este sub-sistema é responsável pela detecção de faltas trifásicas, bifásicas e monofásicas e tem atuação instantânea;
 - Sub-sistema *fuzzy* temporizado: Faltas entre-espiras e entre-caminhos são detectadas por este sub-sistema e requerem coordenação com as demais proteções do SEP;
- ❑ *Confirmação de Falta*: Para evitar a atuação indevida no caso do sub-sistema *fuzzy* instantâneo usou-se um método de confirmação de falta que aguarda algumas amostras para indicar a situação de falta. Já para o sub-sistema *fuzzy* temporizado a confirmação de falta executa função de temporizador para garantir a coordenação entre as proteções do SEP.

Todos os blocos e sub-blocos são explicados em detalhes nas seções subsequentes e uma breve teoria sobre LF é apresentada no Apêndice C.

Figura 74 – Visão Geral do Sistema *Fuzzy* para Proteção de Geradores Síncronos.

5.2.1 Seleção de Atributos para o Sistema *Fuzzy*

A mineração de dados é definida como o processo de descoberta de padrões em um conjunto de dados. Esta busca pode ser automática ou semiautomática. Os padrões descobertos devem conduzir a construção de conhecimento acerca dos dados em análise ou revelar relações entre um conjunto de dados e o comportamento do sistema do qual os dados provém (WITTEN; FRANK, 2005).

A coleta de dados dos mais variados sinais de tensão e corrente de GSs, objeto dos Capítulos 2 e 3, formou um conjunto de dados de 13920 oscilografias de simulação de faltas e 3952 oscilografias de faltas reais. A base de dados usada para seleção de atributos considerou dois instantes de tempo para cada oscilografia coletada. O primeiro instante foi um ciclo anterior a inserção da falta e o segundo, um ciclo após a inserção da falta. Desta forma a base de dados contém 35744 padrões. Essa quantidade de dados requereu uma análise profunda deste conjunto de dados. O objetivo dessa análise foi encontrar quais informações extraídas das formas de corrente e tensão poderiam auxiliar a identificação de faltas em GSs. Usando os valores instantâneos obtidos nos ensaios e simulações, as seguintes medidas derivadas (atributos) foram consideradas:

□ Conteúdo espectral até o oitavo harmônico das:

- Correntes de armadura medidas próximas ao neutro e aos terminais de cada fase;

- Tensões no neutro e nos terminais de cada fase;
- Corrente de campo;
- Componentes simétricas das:
 - Correntes de armadura medida próximas ao neutro e próxima aos terminais de cada fase;
 - Tensões no neutro e terminal de cada fase;
 - Potências ativa e reativa;
- Correntes de operação e restrição de cada fase;
- Diferença angular entre:
 - Correntes medidas próximas ao neutro e terminais de cada fase;
 - Correntes medidas próximas ao terminais da fase A e fase B;
 - Correntes medidas próximas ao terminais da fase A e fase C.

A funcionalidade de seleção de atributos do programa de computador WEKA (HALL et al., 2009) foi utilizada para destacar os atributos mais promissores para identificar condições de falta. Como abordado nos Capítulos 2 e 3, cada situação de falta foi realizada para diferentes condições de carregamento dos GSs sob observação. Desta maneira, os atributos selecionados tendem a ser mais robustos frente a variações no carregamento do GS. Atenção especial foi dada aos atributos que indicassem a presença de faltas entre-espiras e fase-terra próximas ao neutro, porque a maioria dos esquemas de proteção não detectam esses tipos de faltas. Os atributos destacados pela mineração de dados foram avaliados individualmente ou aos pares para melhor compreensão de seus comportamentos durante os eventos de falta com objetivo de investigar a sensibilidade e seletividade destes para faltas externas e internas. Essa análise mostrou que os seguintes atributos são os mais relevantes para identificar situações faltosas.

- Diferença angular entre as correntes medidas perto do neutro e do terminal de cada fase (δ_{aa} , δ_{bb} e δ_{cc}), aqui chamada de ângulo próprio;
- Diferença angular entre as correntes no terminal da fase A e fase B (δ_{ab}) e entre a fase A e C (δ_{ac}), aqui chamada de ângulo mútuo;
- Correntes de operação (I_a^o , I_b^o , I_c^o) e restrição (I_a^r , I_b^r , I_c^r) de cada fase. O cálculo das correntes de operação e de restrição é explicado nas subseções seguintes.

5.2.2 Sub-sistema *Fuzzy* Instantâneo

O sub-sistema *fuzzy* instantâneo tem como objetivo detectar faltas fase-terra, bifásicas ou trifásicas que envolvam o terra ou não. O sub-sistema protege cada fase individualmente, ou seja, são utilizados três módulos idênticos para cada uma das fases. A seguir é apresentado o módulo de proteção instantânea para a fase A, para as demais fases os módulos são rigorosamente iguais.

5.2.2.1 Variáveis de Entrada

Os módulos têm três entradas derivadas das correntes da fase sob proteção medidas nos TC dispostos perto do neutro e próximo aos terminais da máquina. A seguir são apresentadas as entradas para o módulo encarregado da proteção da fase A.

- $\Delta\delta_{aa}$: variação do ângulo próprio das correntes da fase A;
- I_a^o : Corrente de operação da fase A;
- ΔI_a^r : Variação da corrente de restrição da fase A.

A entrada $\Delta\delta_{aa}$ é obtida na etapa de pré-processamento através do cálculo da diferença entre os argumentos do fasor da corrente da fase A que passa pelo TC próximo ao neutro (I_a^n) e do fasor da corrente que passa pelo TC próximo aos terminais da máquina (I_a^t), δ_{aa} na Equação 10. Em seguida, δ_{aa} passa por um filtro *Washout*, cuja função de transferência é mostrada na Equação 11, obtendo-se $\Delta\delta_{aa}$. O filtro *Washout* é um filtro passa-altas que rejeita os sinais de regime permanente, permitindo a passagem dos sinais transitórios. A constante de tempo do filtro foi ajustada para 1 segundo, ou seja, $1/\alpha = 1$. A Figura 75 mostra as funções de pertinência adotadas para $\Delta\delta_{aa}$. O ajuste inicial das funções de pertinência para $\Delta\delta_{aa}$ foi baseada na análise estatística das formas de ondas das oscilografias obtidas nos capítulos 2 e 3. Observou-se o valor médio e desvio máximo da variável para situações normais de operação e para situações de falta. Depois passou-se a uma etapa de ajuste empírico e iterativo, na qual o sistema *fuzzy* recebia entradas que representavam situações de falta e de operação normal e analisava-se a resposta obtida. Caso a resposta obtida fosse incorreta ajustava-se as funções de pertinência. Este método de ajuste foi aplicado a todas as demais entradas dos sistemas *fuzzy*.

$$\delta_{aa} = \arg(I_a^t) - \arg(I_a^n), \quad (10)$$

$$W(s) = \frac{s}{s + \alpha}. \quad (11)$$

Nas medidas de corrente nos ensaios e a na disposição dos TCs na simulação no RTDS considerou-se que as correntes de uma fase que passam pelo ponto de medição ou TC perto do neutro do GS estão defasadas 180° em relação às correntes medidas próximas

Figura 75 – Funções de Pertinência de $\Delta\delta_{aa}$

aos terminais da máquina. Deste modo, a corrente de operação, I_a^o , foi calculada de acordo com a Equação 12. As funções de pertinência definidas para I_a^o são mostradas na Figura 76.

$$I_a^o = |I_a^t + I_a^n| \quad (12)$$

Figura 76 – Funções de Pertinência de I_a^o

A última entrada do módulo é a variação da corrente de restrição, ΔI_a^r . A corrente de restrição (I_a^r) é calculada de acordo com a Equação 13, em seguida um filtro *Washout* com constante de tempo de 1 segundo é aplicado. A aplicação do filtro *Washout* faz com que ΔI_a^r seja zero para qualquer condição de carga, possibilitando desta maneira um ajuste mais sensível do sistema de proteção. A constante de tempo utilizada é rápida suficiente para acompanhar uma eventual mudança de carga no GS sem que a mesma acuse alteração na corrente de restrição. Isso pode ser afirmado, porque o tempo de resposta dos controles de potência ativa e reativa é superior a dezenas de segundos. A Figura 77 mostra as funções de pertinência adotadas para ΔI_a^r .

$$I_a^r = |I_a^t - I_a^n| \quad (13)$$

5.2.2.2 Variável de Saída

A Figura 78 mostra as funções de pertinência da variável de saída deste módulo. A variável de saída foi identificada como sF_a e apresenta dois conjuntos *fuzzy*, um indica o estado normal e o outro defeito.

Figura 77 – Funções de Pertinência de ΔI_a^r Figura 78 – Funções de Pertinência de sF_a

5.2.2.3 Sistema de Inferência e Defuzzyficação

A relação de implicação Mamdani (PATYRA; MLYNEK, 1996) foi adotada como sistema de inferência. O sistema de inferência de cada módulo de proteção instantânea contém 13 regras, apresentadas na Tabela 47, para determinar a abertura dos disjuntores para uma falta interna ou o bloqueio para situações de faltas externas e condições normais de operação. As regras *fuzzy* foram definidas de acordo com o comportamento das variáveis de entrada para situações de operação normal e de falta. Notou-se que quando a variação do ângulo próprio não é *Zero* e a variação da corrente de restrição é *Baixa* ou *Média* isso indica uma situação de falta fase-terra próxima ao neutro do GS (regras 1 a 4). Condições normais de operação, ausência de falta, são identificadas pela regra 5. Constatou-se que durante situações de faltas externas distantes do GS as correntes nos terminais do GS podem ser menores que a corrente nominal de operação. A redução das correntes nos terminais da máquina leva a valores negativos da variação da corrente de restrição ($\Delta I_{a,b,c}^r$). Para essas situações de falta observa-se também a mudança dos ângulos próprios das fases envolvidas na falta. Por consequência, estes tipos de faltas poderiam ser classificadas erroneamente como situações de faltas pelas regras 1 e 2. Deste modo, para evitar essa situação adicionou as regras 6 e 7 para evitar a falsa operação para faltas externas distantes do GS. As regras 8 a 13 refletem o funcionamento de uma proteção diferencial tradicional, estas estabelecem uma relação entre as correntes de operação e de restrição.

O método de *defuzzyficação* usado foi o centro de área geométrica. Caso a saída *defuzzyficada* for superior a 0,33 isso indica uma falta interna.

Tabela 47 – Regras *Fuzzy* para Proteção Instantânea

Regras	Entradas			Saída sF_a
	$\Delta\delta_{aa}$	I_a^o	ΔI_a^r	
1	Positivo	-	Baixa	Defeito
2	Negativo	-	Baixa	Defeito
3	Positivo	-	Média	Defeito
4	Negativo	-	Média	Defeito
5	Zero	-	Baixa	Normal
6	Positivo	-	Muito Baixa	Normal
7	Negativo	-	Muito Baixa	Normal
8	-	-	Alta	Normal
9	-	Alta	Alta	Normal
10	-	Alta	-	Defeito
11	-	Média	Não Alta	Defeito
12	Zero	Baixa	Baixa	Normal
13	Zero	Baixa	Muito Baixa	Normal

5.2.2.4 Sistema de Confirmação de Falta

A TDF de ciclo completo foi utilizada para o cálculo dos fasores necessários para computar as entradas do módulo, deste modo, é necessário esperar ao menos um ciclo completo para o envio do sinal de abertura aos disjuntores. Como sistema de confirmação de falta usou-se a lógica ilustrada na Figura 79. No fluxograma mostrado, sF é saída *defuzzyficada* do módulo, C é uma variável de contagem e N é o número de amostras por ciclo de forma de onda.

5.2.3 Sub-sistema *Fuzzy* Temporizado

O sub-sistema *fuzzy* temporizado tem como objetivo principal detectar faltas entre-espiras e entre-caminhos. Adicionalmente, este sub-sistema pode identificar outros tipos de faltas nas quais se observe alguma mudança na simetria nos enrolamentos de armadura. Faz-se uso de temporização porque a partir das variáveis de entrada não é possível distinguir entre faltas externas e internas. Logo, para garantir a coordenação com as demais proteções do SEP é necessário temporizar a atuação deste sub-sistema. Diferentemente do sub-sistema de proteção instantânea, esse sub-sistema é composto por um único módulo que protege todas as fases.

5.2.3.1 Variáveis de Entrada

Este sub-sistema tem duas entradas derivadas das correntes medidas nos terminais de cada uma das fases. As entradas utilizadas foram:

- $\Delta\delta_{ab}$: variação do ângulo mútuo entre as correntes das fase A (I_a^t) e B (I_b^t);
- $\Delta\delta_{ac}$: variação do ângulo mútuo entre as correntes das fase A (I_a^t) e C (I_c^t).

Figura 79 – Sistema de Confirmação de Falta

Com essas duas entradas é possível identificar variações mínimas na simetria elétrica das correntes, ou seja, quando a defasagem entre as fases deixa de ser 120° . Essa mudança indica a alteração nos enrolamentos de armadura, que podem ser causadas por situações de falta.

A entrada $\Delta\delta_{ab}$, e de maneira similar $\Delta\delta_{ac}$, é obtida na etapa de pré-processamento através do cálculo da diferença dos argumentos entre fasores da corrente nos terminais das fases A (I_a^t) e B (I_b^t), essa diferença é denotada por δ_{ab} na Equação 14. Após o cálculo da diferença, aplica-se o filtro *Washout* (Equação 11), com $\alpha = 1$, para obter-se $\Delta\delta_{ab}$. As funções de pertinência definidas para $\Delta\delta_{ab}$ e $\Delta\delta_{ac}$ são mostradas nas Figuras 80 e 81, respectivamente.

$$\delta_{ab} = \arg(I_a^t) - \arg(I_b^t) \quad (14)$$

5.2.3.2 Variável de Saída

A Figura 82 mostra as funções de pertinência da variável de saída deste módulo. A variável de saída foi identificada como sF_t e apresenta dois conjuntos *fuzzy*, um indica o estado de normal e outro de defeito.

Figura 80 – Funções de Pertinência de $\Delta\delta_{ab}$ Figura 81 – Funções de Pertinência de $\Delta\delta_{ac}$ Figura 82 – Funções de Pertinência de sF_t

5.2.3.3 Sistema de Inferência e Defuzzificação

Assim como no sub-sistema instantâneo a relação de implicação Mamdani foi adotada como sistema de inferência. O sistema de inferência de cada módulo de proteção temporizada contém 5 regras, apresentadas na Tabela 48, para determinar o estado dos enrolamentos, normal ou defeito.

Tabela 48 – Regras Fuzzy para Proteção Temporizada

Regras	Entradas		Saída sF_t
	$\Delta\delta_{ab}$	$\Delta\delta_{ac}$	
1	Positivo	-	Defeito
2	Negativo	-	Defeito
3	-	Positivo	Defeito
4	-	Negativo	Defeito
5	Zero	Zero	Normal

5.2.3.4 Sistema de Temporização

A saída *defuzzificada* do sub-sistema temporizado serve de entrada para um temporizador igual ao mostrado na Seção 5.2.2.4. No fluxograma da Figura 79, N deve ser

ajustado de acordo com a temporização necessária para garantir a coordenação da proteção. Por exemplo, se o tempo de coordenação requerido for 10 segundos, a taxa de amostragem do algoritmo for 8 amostras por ciclo e a frequência do sistema for 60 Hz tem-se que N deve ser:

$$N = 10 \times 8 \times 60 = 4800. \quad (15)$$

5.3 Resultados da Proteção Inteligente de Geradores Síncronos

Esta seção apresenta os resultados obtidos nos testes da proteção inteligente. Primeiramente, foi realizada a análise do funcionamento do sistema *fuzzy* de proteção em condições normais de operação e situações de falta. Em seguida foi avaliado o desempenho das proteções para as oscilografias obtidas nas simulações via RTDS (Capítulo 2) e também para as oscilografias obtidas nos ensaios dos sistemas EESC e SSE (Capítulo 3). Os resultados obtidos são comparados com a resposta obtida da proteção convencional. Por fim, mostra-se o teste em laço fechado com uso do RTDS e do cubo PC104 (Capítulo 4) executando em tempo real, com auxílio da biblioteca *OpenRelay*, o esquema de proteção inteligente proposto neste trabalho.

5.3.1 Análise Funcional do Sistema *Fuzzy*

O primeiro teste realizado no sistema *fuzzy* de proteção foi a análise funcional dos sub-sistemas instantâneo e temporizado. A análise funcional foi realizada com objetivo de observar o correto ajuste das funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy*, as regras de implicação e a configuração dos conjuntos *fuzzy* de saída. Aqui são apresentados dois exemplos de análises realizadas nos sub-sistemas instantâneo e temporizado. Lembra-se que no desenvolvimento do trabalho realizou-se inúmeros testes para cada tipo e condição de falta.

O funcionamento interno do algoritmo de proteção inteligente temporizado é analisado nas Figuras 83 e 84. Na parte superior das figuras mostram-se as formas de onda das correntes das fases A, B e C medidas próximas aos terminais (i_a^t , i_b^t e i_c^t). As formas de onda referem-se a uma oscilografia de falta entre-caminhos (D11-D21) da fase A de G_1^E , o ângulo de incidência foi 0° e o GS fornecia 1000 W de potência ativa e 1000 var de potência reativa à rede elétrica da universidade. Ainda na parte superior das figuras mostra-se a etapa de pré-processamento, na qual observa-se o janelamento dos sinais provenientes da aquisição para o cálculo da TDF para extrair a componente fundamental dos sinais de corrente. Posteriormente, calculam-se os ângulos mútuos entre as fases A e B, e entre as fases A e C (δ_{ab} e δ_{ac}). O pré-processamento finaliza na filtragem *Washout* dos ângulos

mútuos, obtendo-se $\Delta\delta_{ab}$ e $\Delta\delta_{ac}$. Após o pré-processamento, $\Delta\delta_{ab}$ e $\Delta\delta_{ac}$ alimentam o sistema de inferência, mostrado na parte inferior das figuras.

A Figura 83 mostra a execução do algoritmo para o instante de tempo 0,05 s, no qual a falta ainda não foi inserida. Neste momento a etapa de pré-processamento calcula os valores de $\Delta\delta_{ab} = 0,0005$ e $\Delta\delta_{ac} = 0,0043$. De acordo com a *fuzzyficação* o valor de $\Delta\delta_{ab}$ ativa o conjunto “Zero” com grau de pertinência 0,95 e o valor de $\Delta\delta_{ac}$ ativa o conjunto “Zero” com grau de pertinência 0,95. Os conjuntos ativos acionam a regra 5 da Tabela 48. A regra tem como implicação o conjunto de saída “Normal” que está ativo com grau de pertinência 0,95. O conjunto resultante de saída é obtido pelo operador de agregação *Máx-Min* e o método de *defuzzyficação* é o centro de área que indica valor abaixo de 0,33, indicando corretamente a condição normal de operação.

Figura 83 – Funcionamento do Subsistema *Fuzzy* Temporizado em Caso de Operação Normal

O diagrama de blocos da Figura 84 mostra a execução do algoritmo para o instante de tempo 0,13 s, no qual a falta já foi aplicada. Neste momento a etapa de pré-processamento calcula os valores de $\Delta\delta_{ab} = -1,1972$ e $\Delta\delta_{ac} = -0,6526$. De acordo com a *fuzzyficação* o valor de $\Delta\delta_{ab}$ ativa o conjunto “Negativo” com grau de pertinência 1,0 e o valor de $\Delta\delta_{ac}$ ativa o conjunto “Negativo” com grau de pertinência 1,0. Os conjuntos ativos acionam as

regras 2 e 4 da Tabela 48. Estas regras têm como implicação o conjunto de saída “Defeito” que está ativo com grau de pertinência 1,0 para as regras 2 e 4. A *defuzzyficação* indica um valor acima de 0,33, mostrando corretamente que se trata de uma condição de falta.

Figura 84 – Funcionamento do Subsistema *Fuzzy* Temporizado em Caso Falta

As Figuras 85 e 86 mostram funcionamento interno do algoritmo de proteção inteligente instantâneo. Destaca-se nas figuras o funcionamento do sub-sistema de proteção instantânea que monitora a fase C do GS. Na parte superior das figuras mostram-se as formas de onda das correntes da fase C medidas próximas ao neutro (i_c^n) e dos terminais (i_c^t). As formas de onda referem-se a uma oscilografia de falta fase-terra aplicada a 67,5% da fase C de G_1^E , o ângulo de incidência foi 180° e o GS fornecia 1000 W de potência ativa e 1300 var de potência reativa à rede elétrica da universidade. Ainda na parte superior das figuras mostra-se a etapa de pré-processamento, na qual observa-se o janelamento dos sinais provenientes da aquisição para o cálculo da TDF para extrair a componente

fundamental dos sinais de corrente. Em seguida, calculam-se as correntes de operação (I_c^o) e restrição (I_c^r) e o ângulo próprio (δ_{cc}). Por fim, encerra-se o pré-processamento na filtragem *Washout* de I_c^r e δ_{cc} , obtendo-se $\Delta\delta_{cc}$ e ΔI_c^r , respectivamente. Após o pré-processamento, I_c^o , ΔI_c^r e $\Delta\delta_{cc}$ alimentam o sistema de inferência, mostrado na parte inferior das figuras.

A Figura 85 mostra a execução do algoritmo para o instante de tempo 0,05 s, no qual a falta ainda não foi inserida. Neste momento a etapa de pré-processamento calcula os valores de $I_c^o = 0,1470$, $\Delta I_c^r = -0,0212$ e $\Delta\delta_{cc} = 0,0039$. De acordo com a *fuzzyficação* o valor de I_c^o ativa o conjunto “*Baixa*” com grau de pertinência 1,0, o valor de ΔI_c^r ativa os conjuntos “*Baixa*” com grau de pertinência 0,85 e “*Muito Baixa*” com grau de pertinência 0,05 e o valor de $\Delta\delta_{cc}$ ativa o conjunto “*Zero*” com grau de pertinência 0,95. Os conjuntos ativos acionam as regras 12 e 13 da Tabela 47. Ambas as regras têm como implicação o conjunto de saída “*Normal*” que está ativo com grau de pertinência 0,85 para a regra 12 e com grau de pertinência 0,05 para a regra 13. De maneira semelhante ao subsistema temporizado, o conjunto resultante de saída é obtido pelo operador de agregação *Máx-Min* e o método de *defuzzyficação* é o centro de área que indica valor abaixo de 0,33, indicando corretamente a condição normal de operação.

O diagrama de blocos da Figura 86 mostra a execução do algoritmo para o instante de tempo 0,13 s, no qual a falta já foi aplicada. Neste momento a etapa de pré-processamento calcula os valores de $I_c^o = 7,0984$, $\Delta I_c^r = 2,2695$ e $\Delta\delta_{cc} = -1,1043$. De acordo com a *fuzzyficação* o valor de I_c^o ativa o conjunto “*Alta*” com grau de pertinência 0,5, o valor de ΔI_c^r ativa o conjunto “*Média*” com grau de pertinência 0,95 e o valor de $\Delta\delta_{cc}$ ativa o conjunto “*Negativo*” com grau de pertinência 1,0. Os conjuntos ativos acionam a regra 10 da Tabela 47. Esta regra tem como implicação o conjunto de saída “*Defeito*” que está ativo com grau de pertinência 0,5. A *defuzzyficação* indica um valor acima de 0,33, mostrando corretamente que se trata de uma condição de falta.

Figura 85 – Funcionamento do Subsistema *Fuzzy* Instantâneo em Caso de Operação Normal

Figura 86 – Funcionamento do Subsystema *Fuzzy* Instantâneo em Caso Falta

5.3.2 Proteção Convencional de Geradores Síncronos

Com objetivo de estabelecer uma base comparativa para o esquema de proteção proposto, um conjunto de funções de proteção convencionais empregadas atualmente na proteção de GSs foi utilizado. O ajuste das proteções seguiu as recomendações da literatura técnica especializada. Essas funções de proteção foram implementadas usando a biblioteca *OpenRelay*. Foram escolhidas as funções mais utilizadas na proteção dos enrolamentos de armadura, enumeradas a seguir:

1. **Diferencial:** Proteção contra faltas entre fases e parcialmente contra faltas envolvendo o terra;
2. **Sobretensão de neutro sintonizado na frequência fundamental:** Proteção contra faltas fase-terra, com cobertura aproximada de 95%;
3. **Sobretensão de desbalanço:** Proteção contra curto-circuito entre espiras.

A proteção de terceiro harmônico não foi utilizada porque o modelo de GS do RTDS considera os enrolamentos de armadura senoidalmente distribuídos; logo não se observa a componente de terceiro harmônico nas formas de onda do GS. Adicionalmente, os GSs utilizados nos sistemas EESC e SSE não produzem quantidades significativas de terceiro harmônico. A proteção de fase-dividida para detectar faltas entre-espiras não foi considerada porque as correntes que circulam em cada caminho dos enrolamentos de armadura de G_1^E e G_1^S não foram medidas por causa da restrição do número de sensores e do acesso elétrico a cada caminho.

A Figura 87 mostra o arranjo de proteções utilizado, assim como a lógica de atuação. De acordo com Reimert (2006) as funções 59N e 59GN têm suas ações temporizadas entre 0,1 s a 1 min., dependendo da coordenação necessária. No entanto, como as oscilografias obtidas nos ensaios dos sistemas EESC e SSE (Seções 3.2 e 3.3) são de poucos ciclos, insuficiente para observar a atuação temporizada destas funções e avaliar o seu correto funcionamento, foi observada apenas a partida dessas das funções de proteção. O valor de ajuste da função de sobretensão de desequilíbrio escolhido foi $5 V_{rms}$ (INSTITUTE of ELECTRICAL and ELECTRONICS ENGINEERS, 2006b), o ajuste da função de sobretensão de neutro foi ajustado para $3 V_{rms}$ (INSTITUTE of ELECTRICAL and ELECTRONICS ENGINEERS, 2006a) e o ajuste da proteção diferencial é mostrado na Tabela 49 e sua respectiva curva de operação é mostrada na Figura 88 (SIEMENS, 2000).

Tabela 49 – Ajustes da Proteção Diferencial

$PickUp_1$	$Slope_1$	$BasePoint_1$	$Slope_2$	$BasePoint_2$	$PickUp_2$
0,25 p.u.	25%	0,0 p.u.	50%	2,5 p.u.	7,0 p.u.

Figura 87 – Funções de Proteção e Lógica de Atuação.

Figura 88 – Curva Característica de Operação para a Proteção Diferencial

5.3.3 Análise de Desempenho do Sistema de Proteção *Fuzzy*

A seguir é analisado o desempenho do esquema de proteção inteligente. Algumas funções de proteção sofrem influência do carregamento do GS. Logo, com a finalidade de observar essa influência na proteção tradicional e verificar se o carregamento exerce influência sobre as proteções *fuzzy* instantânea e temporizada, dois cenários foram considerados:

- ❑ Cenário 1: A proteção é capaz de detectar o defeito para pelo menos uma condição de carga, dentre os casos analisados;
- ❑ Cenário 2: A proteção é capaz de detectar o defeito independentemente da condição de carga, dentre os casos analisados.

A operação da proteção *fuzzy* ou tradicional é considerada efetiva para o cenário 1 caso em um dado tipo de falta (ex. fase-terra 50%), elas forem capazes de detectar corretamente o defeito em pelo menos um dos carregamentos. Esse é um cenário menos restritivo, diferente do cenário 2 que requer que as proteções atuem corretamente para todos os carregamentos simulados/ensaiados.

Para exemplificar estes cenários, toma-se como exemplo o caso de falta fase-terra aplicada a 50% da fase A de G_1^R do sistema RTDS. Supõe-se que a proteção tradicional não detecte esta falta para a condição em que o GS estava gerando 215 MW de potência ativa e 50 Mvar de potência reativa, no entanto a proteção detectou a mesma falta quando o GS estava gerando 180 MW de potência ativa com fator de potência unitário. Neste caso, diz-se que a proteção é efetiva pelo critério do cenário 1 e não-efetiva para o cenário 2.

5.3.3.1 Resultados para Detecção Instantânea de Faltas

O sub-sistema *fuzzy* instantâneo foi projetado para detectar faltas do tipo fase-fase, fase-terra e quaisquer combinações destas. Para o último tipo foi estudada a influência da resistência de aterramento.

Um dos fatores analisados foi o percentual do enrolamento não coberto pela proteção instantânea para faltas fase-terra. Definiu-se como *Área Cega* o percentual do enrolamento, a contar do neutro do GS, não atendido pela proteção na ocasião de faltas fase-terra.

A Tabela 50 mostra a cobertura da proteção instantânea tradicional e *fuzzy* para as simulações feitas no RTDS. Enfatiza-se que o modelo de GS do RTDS não permite aplicação de faltas em pontos abaixo de 5% do enrolamento de armadura. Os valores da resistência de aterramento estão de acordo com a Tabela 17. A partir dos resultados expostos na Tabela 50, observa-se uma melhora considerável na sensibilidade da proteção para faltas fase-terra, especialmente para o cenário 1.

Como exemplo, destaca-se o caso da resistência de aterramento R_n^5 , que de acordo com a Tabela 17 tem valor de $0,776 \Omega$, a área cega da proteção *fuzzy* para o cenário 1 foi de 5% contra 25% da proteção tradicional e para o cenário 2 a proteção tradicional apresentou uma área cega de 49% contra 5% da proteção *fuzzy*.

A Tabela 51 mostra a área cega das proteções instantâneas para as oscilografias coletadas nos ensaios realizados no sistema EESC. Similarmente ao observado nos resultados para o sistema RTDS, neste caso aqui apresentado a proteção *fuzzy* apresentou menor

Tabela 50 – Área Cega da Proteção *Fuzzy* e Tradicional para Faltas Fase-Terra no Sistema RTDS

Resistência de Aterramento	Cenário 1		Cenário 2	
	<i>Fuzzy</i>	Tradicional	<i>Fuzzy</i>	Tradicional
R_n^1	5,0% [†]	5,0% [†]	5,0% [†]	5,0% [†]
R_n^2	5,0% [†]	5,0% [†]	5,0% [†]	9,0%
R_n^3	5,0% [†]	7,0%	5,0% [†]	15,0%
R_n^4	5,0% [†]	15,0%	5,0% [†]	27,0%
R_n^5	5,0% [†]	25,0%	5,0% [†]	49,0%
R_n^6	5,0% [†]	47,0%	87,0%	100,0%
R_n^7	7,0%	100,0%	100,0%	100,0%
R_n^8	15,0%	100,0%	100,0%	100,0%
R_n^9	31,0%	100,0%	100,0%	100,0%

[†] Menor percentual que o RTDS permite simular.

área cega para ambos os cenários com uma melhora sensível para o cenário 1 e área cega considerando o cenário 2 foi reduzida em pelo menos 25%.

Tabela 51 – Área Cega da Proteção *Fuzzy* e Tradicional para Faltas Fase-Terra no Sistema EESC

Resistência de Aterramento	Cenário 1		Cenário 2	
	<i>Fuzzy</i>	Tradicional	<i>Fuzzy</i>	Tradicional
R_n^1	0,5% [†]	25,5%	17,5%	25,5%
R_n^2	5,0%	47,5%	35,0%	67,5%
R_n^3	10,0%	75,0%	75,0%	100,0%

[†] Menor porção do enrolamento de G_1^E acessível.

A análise dos resultados apresentados na Tabela 52 para faltas fase-terra no sistema SSE necessita de algumas considerações. A primeira refere-se ao aterramento R_n^4 , no qual a resistência de aterramento é infinita, logo não se pode considerar este caso porque não há corrente de falta. A segunda ressalva é sobre as derivações acessíveis do enrolamento de G_1^S , a menor derivação é de 25% seguida de 50%, 75% e 100%. Por causa disto não se pode inferir a área cega para porções de enrolamento menores que 25% ou entre as derivações. No entanto, apesar do número reduzido de derivações acessíveis, é possível observar o mesmo comportamento das proteções destacados no sistema RTDS e EESC.

Tabela 52 – Área Cega da Proteção *Fuzzy* e Tradicional para Faltas Fase-Terra no Sistema SSE

Resistência de Aterramento	Cenário 1		Cenário 2	
	<i>Fuzzy</i>	Tradicional	<i>Fuzzy</i>	Tradicional
R_n^1	25,0% [†]	25,0% [†]	25,0% [†]	25,0% [†]
R_n^2	25,0% [†]	25,0% [†]	25,0% [†]	25,0% [†]
R_n^3	25,0% [†]	50,0%	25,0% [†]	50,0%
R_n^4	-	-	-	-

[†] Menor derivação acessível do enrolamento de G_1^S .

A Tabela 53 mostra a síntese dos resultados das proteções instantâneas. Nesta estão expressados o números de acertos da proteção instantânea *fuzzy* e tradicional e também

o número total de casos considerados, separados pelo tipo de falta. Os acertos referentes a faltas internas correspondem a identificação da falta e para faltas externas a não atuação indevida. Os casos considerados são as oscilografias de faltas fase-terra, fase-fase e trifásicas internas e externas coletadas nos ensaios ou simulações realizados nos sistemas RTDS, SSE e EESC. Observa-se a proteção *fuzzy* foi capaz de identificar corretamente 83,51% das faltas fase-terra sendo que a proteção tradicional identificou 47,17% de todas as faltas deste tipo. A proteção *fuzzy* e tradicional detectaram com sucesso todas as faltas fase-fase e trifásicas internas independentemente do carregamento e ângulo de incidência da falta. Ressalta-se também que não houve nenhum caso de atuação indevida para faltas externas para nenhum tipo de falta.

Tabela 53 – Número de Acertos na Identificação Instantânea de Faltas

Tipo de Falta	Número de Acertos		Total de Casos
	<i>Fuzzy</i>	Tradicional	
Fase-Terra Interna	11109(83,51%)	6275(47,17%)	13303
Fase-Terra Externa	630(100%)	630(100%)	630
Fase-Fase Interna	1129(100%)	1129(100%)	1129
Fase-Fase Externa	732(100%)	732(100%)	732
Trifásica Interna	674(100%)	674(100%)	674
Trifásica Externa	732(100%)	732(100%)	732

5.3.3.2 Resultados para Detecção Temporizada de Faltas

O sub-sistema temporizado foi concebido para detectar faltas entre-espiras e entre-caminhos. Para o estudo da atuação das proteções tradicionais e *fuzzy* para estes tipos de defeitos foram utilizadas somente as oscilografias obtidas no sistema EESC. Isso se deve à restrição do modelo de GS disponível no RTDS para faltas internas que não possibilita a simulação de faltas entre-espiras ou entre-caminhos e a falta de terminais de acesso no GS do sistema SSE.

A atuação deste sub-sistema deve ser temporizada para garantir a coordenação entre as demais proteções do SEP. No entanto, como as oscilografias obtidas possuem apenas cinco ciclos de pós-falta, a análise considerou uma temporização equivalente a um ciclo. Isso não prejudica a análise dos resultados pois desejava-se observar a partida da proteção e não a sua temporização.

A sobretensão de desbalanço é a grandeza monitorada pela proteção tradicional para detectar faltas entre-caminhos ou faltas entre-espiras para máquinas com apenas um caminho por fase. O sub-sistema *fuzzy* temporizado é projetado para detectar os dois tipos de defeitos independentemente do número de caminhos por fase. A detecção de defeitos pela proteção *fuzzy* será eficaz se houver alguma mudança na diferença de ângulo entre as correntes nos terminais do GS.

As respostas das proteções *fuzzy* e tradicional para faltas entre caminhos são mostradas na Tabela 54. As duas primeiras colunas indicam as derivações, de acordo com a Figura 21, conectadas para a configuração do defeito. Ao lado das derivações está indicada entre parênteses a posição da derivação em relação ao neutro e as colunas subsequentes mostram se as proteções atuaram para os cenários considerados.

Os resultados mostram que a proteção *fuzzy* detectou todos os defeitos para o cenário 1 e falhou em apenas um caso para o cenário 2. A detecção de falta pela proteção tradicional falhou em 37,5% dos casos para o cenário 1 e falhou em 75% dos casos para o cenário 2. Pode-se concluir que o sistema *fuzzy* é mais sensível que o método tradicional e sofre menor influência do carregamento e do ângulo de incidência de falta para detectar faltas entre-caminhos.

Tabela 54 – Respostas das Proteções *Fuzzy* e Tradicional para Faltas Entre-Caminhos

Derivações (Porcentagem)		Cenário 1		Cenário 2	
Pos. 1	Pos. 2	<i>Fuzzy</i>	Tradicional	<i>Fuzzy</i>	Tradicional
D23(92,5%)	D09(35,0%)	Atuou	Atuou	Atuou	Atuou
D11(42,5%)	D21(85,0%)	Atuou	Atuou	Atuou	Falhou
D18(72,5%)	D13(50,0%)	Atuou	Falhou	Atuou	Falhou
D06(22,5%)	D01(0,50%)	Atuou	Falhou	Atuou	Falhou
D24(97,5%)	D10(38,0%)	Atuou	Atuou	Atuou	Atuou
D12(47,5%)	D22(87,5%)	Atuou	Atuou	Atuou	Falhou
D19(75,0%)	D16(62,5%)	Atuou	Falhou	Atuou	Falhou
D07(25,5%)	D04(13,0%)	Atuou	Falhou	Atuou	Falhou
D23(92,5%)	D10(38,0%)	Atuou	Atuou	Atuou	Atuou
D11(42,5%)	D22(85,0%)	Atuou	Atuou	Atuou	Falhou
D18(72,5%)	D16(62,5%)	Atuou	Atuou	Falhou	Falhou
D06(22,5%)	D04(13,0%)	Atuou	Falhou	Atuou	Falhou
D24(97,5%)	D09(35,0%)	Atuou	Atuou	Atuou	Atuou
D12(47,5%)	D21(85,0%)	Atuou	Atuou	Atuou	Falhou
D19(75,0%)	D13(72,5%)	Atuou	Falhou	Atuou	Falhou
D07(25,5%)	D01(0,50%)	Atuou	Atuou	Atuou	Falhou

A Tabela 55 apresenta os resultados da proteção tradicional e *fuzzy* para as faltas entre-espiras. Nesta tabela, as duas primeiras colunas mostram as derivações conectadas na aplicação da falta, a terceira coluna indica o percentual do enrolamento envolvido na falta e as colunas seguintes indicam a atuação das proteções para os cenários previamente apresentados.

Os resultados mostram que a proteção tradicional não detectou nenhum dos defeitos aplicados, isso ocorre porque G_1^E possui dois caminhos por fase e quando um dos caminhos sofre uma falta entre espiras, o outro caminho sustenta a tensão nos terminais da máquina, logo a sobretensão de desbalanço não é observada. Por outro lado, a proteção *fuzzy* foi capaz de detectar faltas entre-espiras que envolvem mais 2,8% do enrolamento para o cenário 1 e cenário 2. Observa-se que o carregamento do gerador não tem grande influência

Tabela 55 – Respostas das Proteções *Fuzzy* e Tradicional para Faltas Entre-Espiras

Derivações			Cenário 1		Cenário 2	
Pos. 1	Pos. 2	(%)	<i>Fuzzy</i>	Tradicional	<i>Fuzzy</i>	Tradicional
D01	D04	12,0	Atuou	Falhou	Atuou	Falhou
D09	D10	2,8	Falhou	Falhou	Falhou	Falhou
D02	D03	7,4	Atuou	Falhou	Atuou	Falhou
D18	D19	7,4	Atuou	Falhou	Atuou	Falhou
D23	D24	2,8	Atuou	Falhou	Falhou	Falhou
D17	D20	12,4	Atuou	Falhou	Atuou	Falhou
D06	D07	7,4	Atuou	Falhou	Atuou	Falhou
D13	D16	11,6	Atuou	Falhou	Atuou	Falhou
D05	D08	12,1	Atuou	Falhou	Atuou	Falhou
D14	D15	7,4	Atuou	Falhou	Atuou	Falhou
D21	D22	2,8	Atuou	Falhou	Falhou	Falhou
D11	D12	2,7	Atuou	Falhou	Falhou	Falhou

na detecção de faltas entre-espiras com exceção de faltas que ocorram no limiar de detecção da falta, ou seja, em porções iguais ou menores a 2,8% do enrolamento. Nestes casos o carregamento exerce certa influência na detecção da falta.

A Tabela 56 mostra a síntese dos resultados das proteções temporizadas. Nesta estão expressados o números de acertos da proteção temporizada *fuzzy* e tradicional e também o número total de casos considerados. Os casos considerados são as oscilografias de faltas entre-espiras e entre-caminhos coletadas nos ensaios realizados em G_1^E . Observa-se que a proteção *fuzzy* foi capaz de identificar corretamente 65% das faltas entre-espiras sendo que a proteção tradicional não identificou nenhuma das faltas entre-espiras. A proteção tradicional identificou 31,2% dos casos de faltas entre-caminhos e a proteção *fuzzy* detectou 97,9% de todas as faltas deste tipo.

Tabela 56 – Número de Acertos na Identificação Temporizada de Faltas

Tipo de Falta	Número de Acertos		Total de Casos
	<i>Fuzzy</i>	Tradicional	
Entre-espiras	208(65,0%)	0(0,0%)	320
Entre-caminhos	376(97,9%)	120(31,2%)	384

5.3.4 Teste em Tempo Real em Laço Fechado

Um dos critérios de análise do esquema de proteção *fuzzy* é verificar se a técnica proposta é aplicável na prática. Para tanto é necessário observar se os algoritmos desenvolvidos podem ser embarcados em um *hardware*. Para observar esse requisito, usou-se o Cubo PC104 em conjunto com a biblioteca *OpenRelay*, ambos apresentados no Capítulo 4. As entradas analógicas da placa de aquisição de dados do cubo PC104 foram conectadas à interface de saída analógica do RTDS e uma saída digital do PC104 foi ligada à

interface digital de entrada do RTDS, configurando deste modo um teste em laço fechado. No RTDS foi simulado o SEP discutido no Capítulo 2, os sinais dos secundários do TPs e TC, conectados ao gerador G_1^R , foram enviados à interface de saída analógica do RTDS. O estado do disjuntor que conecta G_1^R foi associado ao estado lógico de uma das entradas digitais do RTDS. A Figura 89 ilustra o esquema de teste montado.

Figura 89 – Ilustração do Esquema de Teste em Laço Fechado

No cubo PC104 foi primeiramente embarcado o esquema de proteção tradicional. No RTDS foram simuladas sequências de faltas, durante as quais foram coletados o tempo de processamento da proteção em análise e o tempo de atuação da mesma. As mesmas condições de teste foram aplicadas à proteção *fuzzy*, também embarcada no cubo PC104.

5.3.4.1 Tempo de Atuação das Proteções

O tempo de atuação foi medido através de um bloco lógico do RTDS que tem função de cronometrar o tempo decorrido entre dois eventos. O evento que inicia a contagem é a aplicação da falta e o evento que para o cronômetro é a resposta recebida pela entrada digital do RTDS, a qual indica a atuação da proteção embarcada.

Para a coleta do tempo de atuação foi considerado um caso de falta fase-terra aplicada a 50% do enrolamento de armadura de G_1^R , a resistência de aterramento usada foi 0,048 Ω , o carregamento do G_1^R foi ajustado para 200 MW e -50 Mvar e o ângulo de incidência de falta foi 90°. Essa situação de falta foi repetida 100 vezes para obter o tempo médio, variância, máximo e mínimo tempo de atuação das proteções. A condição de falta foi mantida constante para evitar a influência do tipo e condição da falta no tempo de atuação, porque com esse teste busca-se observar a repetibilidade dos tempos de atuação para a mesma situação de falta.

As proteções tradicional e *fuzzy* temporizadas foram ajustadas para atuar após 500 ms da detecção da falta. A Tabela 57 mostra o tempo médio de atuação das proteções tradicional e *fuzzy*, assim como a variância, valor máximo e mínimo. A variância dos

tempos de atuação foram baixos para todas as proteções. O desvio máximo observado para o tempo de atuação foi de 2,65 ms em relação ao valor médio, o que equivale a 2,5 intervalos de amostragens.

Tabela 57 – Tempo de Atuação das Proteções

Proteção	Instantânea		Temporizada	
	Tradicional	<i>Fuzzy</i>	Tradicional	<i>Fuzzy</i>
Médio (<i>ms</i>)	18,782	18,035	501,877	501,950
Variância (<i>ms</i> ²)	0,371	0,362	0,389	1,567
Máximo (<i>ms</i>)	19,750	19,100	502,800	504,600
Mínimo (<i>ms</i>)	17,750	17,050	500,800	500,500

Para ilustrar a simulação em laço fechado, duas oscilografias registradas no RTDS para a falta simulada são mostradas. A oscilografia da Figura 90 mostra a atuação da proteção tradicional e a Figura 91 mostra a atuação da proteção *fuzzy* para a mesma situação.

Figura 90 – Oscilografia da Resposta da Proteção Tradicional para o Teste em Laço Fechado

As oscilografias mostram as tensões nos terminais, as correntes nos enrolamentos de armadura e no neutro de G_1^R e a corrente de falta (i_f). Além das medidas elétricas de G_1^R , são mostradas as respostas das proteções embarcadas. Na parte inferior dos gráficos têm-se as saídas lógicas de todas as funções de proteção, na qual a linha cheia indica o estado ativo. Como os sinais provenientes do cubo PC104 foram associados ao comando de abertura do disjuntor a montante de G_1^R , observa-se após a detecção da falta que as correntes que circulam no GS tendem a zero, com exceção da fase com defeito. As correntes das fases sãs tendem a zero porque o caminho para a circulação da corrente

para o restante do SEP foi interrompida pelo disjuntor. O mesmo não ocorre para a corrente i_a^n porque o defeito ainda persiste na máquina oferecendo um caminho através do ponto de falta, passando pelo neutro e retornando ao enrolamento de estator da fase A.

Figura 91 – Oscilografia da Resposta da Proteção *Fuzzy* para o Teste em Laço Fechado

5.3.4.2 Tempo de Processamento do Sistema de Proteção *Fuzzy*

A análise do tempo de processamento tem como objetivo comparar o tempo gasto para executar a função de proteção *fuzzy* e o tempo necessário para executar a proteção tradicional. A medição do tempo de processamento foi realizada por uma função da biblioteca *OpenRelay* especializada para esse fim. A análise realizada separou as etapas necessárias para a execução das rotinas de proteção em quatro conjuntos:

- ❑ *Aquisição*: Esta etapa compreende a amostragem do sinal proveniente do ambiente externo e subsequente digitalização;
- ❑ *Pré-Processamento*: Os sinais digitalizados pela etapa de aquisição são processados para alimentar as funções de proteção. Como exemplo de processamento cita-se a TDF para o cálculo dos fasores de corrente;
- ❑ *Proteção*: O algoritmo que indica o estado do equipamento protegido está contido nesta etapa.
- ❑ *Lógica*: Combinações lógicas entre as respostas da etapa de proteção e as temporizações necessárias estão encerradas nesta etapa.

Lembra-se que o tempo disponível para a execução dessas etapas é o intervalo de tempo entre amostragens. Adianta-se que para a proteção *fuzzy* e tradicional a somatória das quatro etapas não superou, em nenhuma situação, este tempo limite.

A Figura 92 mostra a sequência de execução das etapas dos algoritmos ao longo do tempo, na qual $T(k)$ denota o tempo em que ocorrem as interrupções periódicas que iniciam a aquisição de dados, $T_a(k)$, $T_m(k)$, $T_p(k)$ e $T_l(k)$ indicam o fim das etapas de aquisição, pré-processamento, proteção e lógica, respectivamente.

Figura 92 – Tempo de Execução dos Algoritmos de Proteção *Fuzzy* e Tradicional.

A avaliação do tempo de execução busca evidenciar a utilização do tempo de processamento disponível de cada bloco dos algoritmos de proteção tradicional e *fuzzy*. Para calcular o tempo de execução da etapa de aquisição (T_{aqu}), pré-processamento (T_{pre}), proteção (T_{pro}) e lógica (T_{log}) foram utilizadas as Equações 16 a 19, nas quais k indica a k -ésima execução do algoritmo tradicional ou *fuzzy*. Para o cálculo do tempo de inatividade (T_{ina}) utilizou-se a Fórmula 20.

$$T_{aqu}(k) = T_a(k) - T(k) \quad (16)$$

$$T_{pre}(k) = T_m(k) - T_a(k) \quad (17)$$

$$T_{pro}(k) = T_p(k) - T_m(k) \quad (18)$$

$$T_{log}(k) = T_l(k) - T_p(k) \quad (19)$$

$$T_{ina}(k) = T(k+1) - T_l(k) \quad (20)$$

Para realizar essa avaliação foram medidos os tempos de execução das etapas dos algoritmos durante um intervalo de cinco minutos, que corresponde a 144000 ciclos de execução. Durante os cinco minutos de observação simulou-se uma sequência de situações de faltas com duração de 1 segundo em intervalos de 30 segundos, alternando entre faltas internas e externas à G_1^R . Esse teste busca identificar alguma mudança significativa nos tempos de execução das etapas em diversas situações de operação.

A Tabela 58 mostra as estatísticas do tempo de processamento da etapa de aquisição. O tempo médio da aquisição para proteção *fuzzy* é aproximadamente 60% do tempo

requerido para mesma etapa da proteção tradicional. Isso se explica pelo número de variáveis monitoradas pela proteção tradicional ser maior que o requerido pela proteção *fuzzy*, porque o esquema *fuzzy* necessita somente das correntes que entram e saem do estator, que totalizam seis variáveis monitoradas. Para a proteção tradicional são necessárias as tensões nos terminais do GS para o cálculo da tensão de desbalanço e a tensão no neutro. O tempo médio consumido pela etapa de aquisição foi 339,10 μs para a proteção tradicional e 203,46 μs para a proteção *fuzzy*. A variância para as duas proteções apresentou valor baixo e os valores máximo e mínimo estão dentro do intervalo esperado de $\pm 20 \mu s$ devido à latência do sistema operacional.

Tabela 58 – Tempo de Execução da Etapa de Aquisição (T_{aqu})

Proteção	Tradicional	<i>Fuzzy</i>
Médio (μs)	339,10	203,46
Variância (μs^2)	1,3202	0,4753
Máximo (μs)	357,27	214,36
Mínimo (μs)	335,62	201,38

As estatísticas para a etapa de pré-processamento são mostradas na Tabela 59. Para a proteção *fuzzy* o tempo de processamento desta etapa inclui o cálculo dos fasores das correntes que circulam pelo estator do GS, o cálculo das correntes de operação e de restrição, diferenças angulares e filtros *Washout*. Já para a proteção tradicional o tempo de processamento considera o cálculo dos fasores das correntes que circulam pelo estator, os fasores das tensões nos terminais e neutro e o cálculo da tensão de desbalanço. Observa-se que o tempo médio de pré-processamento para a proteção *fuzzy* é aproximadamente 72 μs menor que para a proteção tradicional. Novamente, as duas proteções apresentaram baixa variância para esta etapa e os valores máximos e mínimos ficaram dentro do intervalo de latência.

Tabela 59 – Tempo de Execução da Etapa de Pré-Processamento (T_{pre})

Proteção	Tradicional	<i>Fuzzy</i>
Médio (μs)	467,78	395,60
Variância (μs^2)	1,8963	2,5283
Máximo (μs)	482,16	410,71
Mínimo (μs)	462,77	390,63

A Tabela 60 traz as estatísticas do tempo de processamento utilizado pela etapa de proteção. A etapa de proteção da técnica tradicional engloba a proteção diferencial das três fases e as proteções de sobretensão de neutro e de desbalanço. Já para o esquema *fuzzy* essa etapa resume-se ao sistema de inferência *fuzzy*. O valor médio de processamento da etapa de proteção do sistema *fuzzy* foi aproximadamente 65% maior que a proteção tradicional. Isso se deve principalmente ao método de *defuzzificação* utilizado, o centro de área geométrica. Este método calcula a área, através da integração trapezoidal, para

obter o centro de área das variáveis de saída. A integração trapezoidal é muito custosa computacionalmente, no entanto, os resultados de tempo de processamento mostram que é possível utilizá-la em tempo real.

Tabela 60 – Tempo de Execução da Etapa de Proteção (T_{pro})

Proteção	Tradicional	<i>Fuzzy</i>
Médio (μs)	339,10	552,18
Variância (μs^2)	1,3202	1203,63
Máximo (μs)	357,27	720,09
Mínimo (μs)	335,62	348,48

A variância do tempo de processamento da proteção tradicional foi baixo e observou-se que os valores de máximo e mínimo estão próximos do valor médio observado. Por outro lado, a variância da proteção *fuzzy* apresentou um valor elevado e os valores máximo e mínimo se distanciaram do valor médio. Para compreender melhor a causa deste comportamento a Figura 93, que traz o tempo de processamento consumido pelo sistema de inferência *fuzzy*, foi analisada. Neste gráfico é possível observar mudanças abruptas no tempo de processamento. Essas mudanças estão espaçadas em intervalos de 30 s. Isso coincide com o intervalo de tempo entre a aplicação consecutivas de faltas no SEP simulado no RTDS. Deste modo, pode-se inferir que durante as situações de falta o valor das variáveis de entrada mudam, alterando deste modo as regras ativadas no sistema de inferência *fuzzy*, que por sua vez modificam a variável de saída. A mudança das variáveis de saída altera a área a ser calculada pela etapa de *defuzzificação* requerindo distintos tempos de processamento. Nos vales entre os picos, as regras de bloqueio dos sub-sistemas instantâneo e temporizado estão ativas. Os cinco primeiros picos referem-se a faltas internas e os quatro picos de processamento subsequentes são situações de falta externa.

Figura 93 – Tempo de Processamento do Sistema de Inferência *Fuzzy*

A Tabela 61 apresenta as estatísticas para a etapa de lógica. O tempo médio consumido pelo esquema *fuzzy* foi quase duas vezes e meia maior que o tempo necessário para o esquema tradicional. O que mais contribuiu para essa diferença foi o sistema de confirmação de falta que é um pouco mais elaborado computacionalmente que os temporizadores usados na proteção tradicional. A variância para ambas as proteções foram baixas e os valores de máximo e mínimo divergiram menos que $11 \mu s$ do valor médio.

Tabela 61 – Tempo de Execução da Etapa de Lógica (T_{log})

Proteção	Tradicional	<i>Fuzzy</i>
Médio (μs)	16,06	39,52
Variância (μs^2)	0,0984	0,2397
Máximo (μs)	25,37	49,56
Mínimo (μs)	15,02	37,57

Os gráficos da Figura 94 buscam destacar o tempo gasto na execução de cada etapa dos esquemas de proteção frente ao tempo total disponível para o processamento. A taxa de amostragem utilizada foi de oito amostras por ciclo de 60 Hz. Os quatros gráficos mostram a visão geral do tempo de processamento requerido para duas situações distintas, sendo que uma considera o tempo médio de processamento e a outra considera o tempo máximo de processamento de cada etapa observado nos dados coletados. A análise da última situação é necessária para garantir que o esquema de proteção seja executado dentro do limite de tempo para qualquer condição operativa do algoritmo. Observa-se que o tempo de execução das funções de proteção *fuzzy* e tradicional foi inferior ao tempo máximo permitido para ambas situações analisadas. As parcelas de processamento das etapas da proteção tradicional praticamente não se alteram para as duas situações. O mesmo comportamento se repetiu para a proteção *fuzzy*, com exceção da etapa de proteção que se observou um aumento de 7% entre o tempo médio e tempo máximo de processamento.

Figura 94 – Visão Geral do Tempo de Processamento das Proteções Tradicional e *Fuzzy*

Considerações Finais

Em um SEP é de fundamental importância a rápida e precisa detecção de anomalias, ou seja, a indicação de situações faltosas para que estas possam ser rapidamente eliminadas. Um sistema de proteção mal ajustado pode não atuar em situações de defeitos dentro de sua zona de proteção ou atuar indevidamente para faltas externas a sua zona de proteção. Isso leva ao comprometimento da segurança e da estabilidade do SEP. Sabe-se que situações faltosas prolongadas podem danificar os componentes do SEP o que acarreta em custos de manutenção e acréscimo do tempo de restabelecimento. Portanto, quanto maior a eficiência na detecção e isolamento das situações anormais, mais estável, seguro e rentável será a operação do SEP. Entre os equipamentos a serem protegidos, destacam-se os GSs devido ao seu elevado custo e perdas financeiras causadas por paradas não programadas.

Neste contexto este trabalho de pesquisa tem como contribuição principal a criação de um novo sistema de proteção que seja mais eficiente na detecção de faltas internas aos enrolamentos de armadura de GSs do que os sistemas de proteção empregados atualmente. O sistema proposto utiliza LF para identificar faltas entre-espiras, entre-caminhos, fase-fase, trifásicas e fase-terra. O esquema de proteção foi testado para as mais diversas condições de carga dos GSs. O uso de oscilografias de faltas coletadas em GSs reais proporcionou análises profundas conferindo maior confiabilidade aos resultados obtidos. O algoritmo proposto foi embarcado na plataforma de teste composta pelo *Cubo PC104* e pela biblioteca *OpenRelay* para testes em tempo-real no qual verificou-se sua aplicabilidade em campo.

A proteção tradicional, assim como o sub-sistema *fuzzy* instantâneo, detectou corretamente todas as faltas bifásicas e trifásicas de maneira seletiva, ou seja, sem atuação indevida para faltas externas. A proteção *fuzzy* instantânea detectou corretamente 83,51% das faltas fase-terra enquanto a proteção convencional detectou 47,17%. Para a detecção de faltas fase-terra observou-se a redução significativa da área cega em comparação com a proteção convencional, além disso a proteção *fuzzy* instantânea foi menos susceptível a variações do carregamento do GS do que a proteção tradicional. Esse comportamento

foi observado para as oscilografias das simulações de faltas feitas no sistema RTDS e as oscilografias provenientes dos experimentos de faltas realizados nos sistemas EESC e SSE.

O sub-sistema *fuzzy* temporizado foi capaz de identificar 97,9% de todos os casos de faltas entre-caminhos aos quais o sistema EESC foi submetido, enquanto a proteção convencional foi capaz de identificar apenas 31,2% das faltas deste tipo. Além disso os resultados mostram que a detecção deste tipo de defeito é praticamente independente da condição de carregamento do GS.

Outro aspecto de melhoria obtida na proteção de GSs foi a detecção confiável de faltas entre-espiras que envolvam mais de 2,8% do enrolamento. Destacando que para porções acima de 2,8% a detecção é robusta a variações de carregamento do GS. No entanto, ressalta-se que faltas entre-espiras que englobem menos que 2,8% são passíveis de detecção para algumas condições de carregamento do GS. Relembra-se que a proteção tradicional não foi capaz de detectar nenhuma das situações de faltas entre-espiras coletadas nos experimentos e que a proteção *fuzzy* temporizada detectou 65,0% de todas as faltas entre-espiras consideradas.

Ressalta-se que o ajuste das regras e conjuntos *fuzzy* foi o mesmo para os testes com oscilografias do sistema RTDS, EESC e SSE e neste último para dois valores de τ'_{do} distintos, 5,0 e 2,6 s, emulando máquinas de portes diferentes. Isso mostra que o sistema de proteção desenvolvido tem potencial de aplicação em GSs de grande e pequeno porte com pouco ou nenhum ajuste.

Os testes embarcados demonstraram que é factível a utilização do algoritmo de proteção *fuzzy*. Os dados sobre o tempo de processamento mostraram que a técnica proposta adiciona apenas 9% em média e no máximo 16% ao tempo de processamento requerido a sua execução em comparação ao tempo necessário para execução da proteção tradicional. Adicionalmente o teste em laço fechado evidenciou que o tempo de atuação das funções de proteção *fuzzy* temporizadas e instantâneas são compatíveis aos tempos de atuação observados na proteção tradicional. Os desvios máximos dos tempos de atuação em relação a média para as proteções instantâneas foram 5,5% para proteção *fuzzy* e 5,9% para a proteção tradicional. As proteções temporizadas apresentaram desvios máximos em relação ao tempo de atuação ajustado de 0,92% e 0,56% para as proteções *fuzzy* e convencional, respectivamente.

Como contribuições secundárias ao trabalho desenvolvido destacam-se:

- A composição de um extenso banco de oscilografias de situações de faltas. Parte das oscilografias (13920 casos de falta) foram obtidas através da simulação de um SEP completo via RTDS considerando faltas fase-terra, fase-fase e trifásicas em um GS de grande porte. Outra parte das oscilografias (3952 casos de falta) foram coletadas através de ensaios de faltas internas em dois GSs reais. Diversas condições de faltas foram ensaiadas/simuladas nas quais foram variadas o tipo da falta, porção do enrolamento envolvido, ângulo de incidência e carregamento dos GSs. Essa base de

oscilografias alimentou os testes dos algoritmos de proteção tradicional e inteligente. Enfatiza-se que até o presente momento não se encontrou na literatura técnica, um conjunto de ensaios de faltas internas em GSs que contemplasse todas as condições consideradas neste trabalho.

- ❑ O desenvolvimento de uma biblioteca de *software*, chamada *OpenRelay*, que reuniu as principais funções de proteção tradicionais de SEPs, com especial atenção às funções de proteção de GS. Essa biblioteca contempla todas as etapas necessárias ao funcionamento de um relé, como a aquisição de dados, pré-processamento, os algoritmos de proteção em si e a oscilografia. Durante o desenvolvimento desta, buscou-se estender o seu uso a aplicações em tempo real possibilitando testes mais complexos, além de análises comparativas com relés comerciais. Após uma pesquisa criteriosa não se observou nenhuma biblioteca de *software* com esse enfoque.
- ❑ A proposição de um conjunto de *hardware*, apelidado de *Cubo PC104*, desenvolvido com o intuito de servir de plataforma para testes de novos algoritmos de proteção. O desenvolvimento de novos algoritmos é facilitado pela utilização de uma placa de processamento aliada à uma placa de aquisição de dados que seguem o padrão PC104 (PC/104 Consortium, 2009), um padrão para placas de computadores industriais, sendo que o Linux foi escolhido como SO.

6.1 Continuação da Pesquisa

As sugestões propostas para a continuidade da pesquisa são:

- ❑ Aprofundar o estudo das oscilografias obtidas nos ensaios de faltas internas em GSs especialmente, máquinas com polos lisos com múltiplos caminhos por fase;
- ❑ Desenvolvimento de um modelo numérico para simulação de faltas internas em GSs que contemple faltas entre-espiras e entre-caminhos, usando as oscilografias de ensaios de faltas internas para validar este modelo;
- ❑ Investigar o uso de TW na etapa de pré-processamento para o sistema *fuzzy*. Isso pode tornar a identificação de faltas mais rápida, pois não será necessário esperar por um ciclo completo pela confirmação de falta;
- ❑ Averiguar a utilização de RNAs para a identificação e classificação de faltas internas em GSs;
- ❑ Examinar a possibilidade de localizar a posição de faltas internas em GSs, isso facilitaria a manutenção do equipamento.

Referências

ABBOTT, D. **Linux for embedded and real-time applications**. [S.l.]: Newnes, 2006.

AMARAL, N. B. D. S. **Estudo sobre critérios para a especificação de transformadores elevadores de estações geradoras (“generator step-up transformers”)**. 101 p. Dissertação (Mestre em Engenharia) — Universidade de São Paulo. Escola Politécnica, 2007.

ANDERSON, P. M. **Analysis of faulted power systems**. [S.l.]: IEEE Press, 1995. 513 p. ISBN 0780311450.

ATP. **Alternative transients program**: Rule book. 1987.

BAGHZOUZ, Y. et al. Time-varying harmonics. i. characterizing measured data. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1998. v. 13, n. 3, p. 938–944, 1998.

BARBOSA, D. **Sistema híbrido inteligente para o monitoramento e proteção de transformadores de potência**. 232 p. Tese (Doutor em Ciências) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2010.

BARBOSA, D. et al. Modified least mean square algorithm for adaptive frequency estimation in power systems. In: **IEEE Power and Energy Society General Meeting**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1 –6. ISSN 1932-5517.

_____. Lógica fuzzy aplicada na proteção de transformadores. In: **VIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**. Florianópolis: [s.n.], 2007.

BOLDEA, I. **Synchronous Generators**. New York: CRC, 2006.

BRAGA, A. d. P.; FERREIRA, P. A. C. d. L.; LUDERMIR, T. B. **Redes neurais artificiais**: teoria e aplicações. [S.l.]: LTC Editora, 2000.

CAVALLO, A.; SETOLA, R.; VASCA, F. **Using MATLAB, SIMULINK, and control system toolbox**: a practical approach. [S.l.]: Prentice Hall, 1996. 405 p. ISBN 0132610582.

COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. **Proteção digital de sistemas elétricos de potência: dos relés eletromecânicos aos microprocessados inteligentes**. 1. ed. São Carlos: EDUSP, 2007.

CRUZ, S.; CARDOSO, A. Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors, by the extended park’s vector approach. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2001. v. 37, n. 5, p. 1227–1233, 2001.

DARWISH, H.; TAALAB, A.-M.; KAWADY, T. Development and implementation of an ann-based fault diagnosis scheme for generator winding protection. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2001. v. 16, n. 2, p. 208–214, abr. 2001. ISSN 08858977.

DEBIAN GNU/Linux. 2012. Disponível em: <<http://www.debian.org/>>.

DEHKORDI, A. et al. Development and validation of a comprehensive synchronous machine model for a real-time environment. In: **IEEE Power Energy Society General Meeting**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1. ISSN 1944-9925.

DOMMEL, H. Digital computer solution of electromagnetic transients in single-and multiphase networks. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 1969. PAS-88, n. 4, p. 388–399, abril 1969. ISSN 0018-9510.

FUCHS, R. **Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas**: teorias das linhas em regime permanente. [S.l.]: Livros Técnicos e Científicos, 1979. ISBN 9788521600824.

FULCZYK, M.; MYDLIKOWSKI, R. Influence of generator load conditions on third-harmonic voltages in generator stator winding. **IEEE Transaction on Energy Conversion**, 2005. v. 20, n. 1, p. 158–165, 2005. ISSN 1558-0059.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R. Modelagem, controle, sistemas e lógica fuzzy. **Revista da SBA Controle & Automação**, 1994. v. 4, n. 3, p. 97–115, 1994.

GRIFFIN, C. H.; POPE, J. W. Generator ground fault protection using overcurrent, overvoltage, and undervoltage relays. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 1982. PAS-101, n. 12, p. 4490–4501, 1982.

GUOPEI, W. et al. A novel method for large turbine generator protection based on wavelet transformation. In: **International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management**. [S.l.: s.n.], 2000. v. 1, p. 254–258.

HALL, M. et al. The WEKA data mining software. **ACM SIGKDD Explorations Newsletter**, 2009. v. 11, n. 1, p. 10, nov. 2009. ISSN 19310145.

INSTITUTE of ELECTRICAL and ELECTRONICS ENGINEERS. Dynamic models for steam and hydro turbines in power system studies. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 1973. PAS-92, n. 6, p. 1904–1915, November 1973. ISSN 0018-9510.

_____. **C37.112**: IEEE standard inverse-time characteristic equations for overcurrent relays. [S.l.], 1997.

_____. **Std 242**: IEEE recommended practice for protection and coordination of industrial and commercial power systems. [S.l.], 2001. 740 p.

_____. **C37.101**: IEEE guide for generator ground protection. [S.l.], 2006.

_____. **C37.102**: IEEE guide for ac generator protection. [S.l.], 2006.

_____. **Std 421.5**: Recommended practice for excitation system models for power system stability studies. [S.l.], 2006. 85 p.

- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC-60255 Electrical Relays: Part 4: Single input energizing quantity measuring relays with dependent specified time.** [S.l.], 1976.
- _____. **IEC-61850 Communication networks and systems in substations: Part 1: Introduction and overview.** [S.l.], 2003.
- JAMSHIDI, M.; VADIEE, N.; ROSS, T. J. **Fuzzy logic and control: software and hardware applications.** [S.l.]: PTR Prentice Hall, 1993.
- JIAJIE, Z.; NENGLING, T.; CHEN, C. A novel differential protection scheme for the generator. In: **IEEE Power Engineering Society General Meeting.** [S.l.: s.n.], 2007. p. 1–6. ISSN 1932-5517.
- JIANG, S. **Investigation of small signal dynamic performance of IPFC and UPFC devices embedded in AC networks.** 169 p. Tese (Doutorado) — Department of Electrical and Computer Engineering, University of Manitoba, 2010.
- JIANG, S.; ANNAKKAGE, U.; GOLE, A. A platform for validation of facts models. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2006. v. 21, n. 1, p. 484–491, jan. 2006. ISSN 0885-8977.
- KASZTENNY, B.; FINNEY, D. Generator protection and ct-saturation problems and solutions. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2005. v. 41, n. 6, p. 1452–1457, 2005.
- KRAUSE, P. C.; WASYNCZUK, O.; SUDHOFF, S. D. **Analysis of electric machinery.** [S.l.]: McGraw-Hill Singapore, 1995.
- KUFFEL, R. et al. RTDS - a fully digital power system simulator operating in real time. In: **IEEE Conference Communications, Power, and Computing Proceedings.** [S.l.: s.n.], 1995. v. 2, p. 300 –305 vol.2.
- LAPLANTE, P. A. **Real-time systems design and analysis.** 3. ed. [S.l.]: Wiley-IEEE Press, 2004. ISBN 0471228559.
- MAGUIRE, T.; GIESBRECHT, J. Small time-step ($<2\mu$ sec) vsc model for the real time digital simulator. In: **International Conference on Power Systems Transients.** Montreal: [s.n.], 2005. p. 6.
- MANTEGAZZA, P.; DOZIO, E.; PAPACHARALAMBOUS, S. RTAI: Real time application interface. **Linux Journal**, 2000. Belltown Media, v. 2000, n. 72, p. 10, 2000.
- MARTI, J. R.; LOUIE, K. W. A phase-domain synchronous generator model including saturation effects. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1997. v. 12, n. 1, p. 222–229, 1997. ISSN 1558-0679.
- MCDONALD, J. **Electric Power Substations Engineering.** [S.l.]: CRC press, 2003.
- MCLAREN, P. et al. Open systems relaying. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1994. v. 9, n. 3, p. 1316–1324, jul. 1994. ISSN 08858977.
- MEGAHED, A.; MALIK, O. Synchronous generator internal fault computation and experimental verification. **IEE Generation, Transmission and Distribution Proceedings**, 1998. v. 145, n. 5, p. 604–610, 1998.

MEGAHED, A. I.; MALIK, O. P. An artificial neural network based digital differential protection scheme for synchronous generator stator winding protection. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1999. v. 14, n. 1, p. 86–93, 1999.

MONARO, R. M. et al. Improving synchronous generator's differential protection with the use of artificial neural networks. In: **IEEE Power and Energy Society General Meeting**. San Diego: [s.n.], 2012. p. 1–8. ISSN 1944-9925.

_____. Sistema integrado para desenvolvimento e execução em tempo real de algoritmos de proteção de sistemas elétricos. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, 2012. v. 23, p. 202–215, Abril 2012. ISSN 0103-1759.

_____. Experimental platform for controlled faults on synchronous generator armature windings. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 2012. v. 27, n. 4, p. 948–957, december 2012. ISSN 0885-8969.

MORO, V.; MONARO, R. M.; VIEIRA de M. Desenvolvimento e validação em tempo real de um algoritmo de proteção de sobrecorrente de tempo inverso. In: **IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**. Goiânia: [s.n.], 2012. p. 1–6.

MUTHUMUNI, D. S.; DIRKS, E. Internal fault simulation in synchronous machines. In: **Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering**. [S.l.: s.n.], 2000. v. 2, p. 1202–1206.

NAGPAL, M. et al. Experience with testing and modeling of gas turbines. In: **IEEE Power Engineering Society Winter Meeting**. [S.l.: s.n.], 2001. v. 2, p. 652–656.

NENGLING, T.; CHEN, C. New generator split-phase transverse differential protection based on wavelet transform. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2006. v. 21, n. 4, p. 1817–1823, out. 2006. ISSN 0885-8977.

NISSEN, S. Implementation of a fast artificial neural network library (FANN). **Department of Computer Science University of Copenhagen (DIKU)**, 2003. 2003.

PATYRA, M. J.; MLYNEK, D. M. **Fuzzy logic: implementation and applications**. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1996. ISBN 0-471-95059-9.

PC/104 Consortium. **PC104 Embedded Consortium**. 2009. Disponível em: <<http://www.pc104.org>>.

PEDRYCZ, W. **Fuzzy control and fuzzy systems**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1993.

PENMAN, J.; JIANG, H. The detection of stator and rotor winding short circuits in synchronous generators by analysing excitation current harmonics. In: **International Conference on Opportunities and Advances in International Electric Power Generation**. [S.l.: s.n.], 1996. p. 137–142. ISSN 0537-9989.

POPE, J. W. A comparison of 100% stator ground fault protection schemes for generator stator windings. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 1984. PAS-103, n. 4, p. 832–840, 1984. ISSN 0018-9510.

QNX. **Qnx home page**. 2013. Disponível em: <<http://www.qnx.com>>.

- RADA-VILELA, J. **Fuzzy logic control library**. 2012. Disponível em: <<http://code.google.com/p/fuzzylite>>.
- REICHMEIDER, P. P. et al. Partitioning of synchronous machine windings for internal fault analysis. **Energy**, 2000. v. 15, n. 4, p. 372–375, 2000.
- REIMERT, D. **Protective relaying for power generation systems**. [S.l.]: CRC Press, 2006.
- RTDS Technologies. **Real time digital simulator manual set: Power system users manual**. [S.l.], 2006.
- RUAN, J.; LIN, J. The application of DSP technique in the field of relay protection. In: **International Conference on Communications, Circuits and Systems Proceedings**. [S.l.: s.n.], 2005. v. 2.
- RUNTZ, K. et al. Digital control scheme for a generating unit. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 1973. PAS-92, n. 2, p. 478–483, march 1973. ISSN 0018-9510.
- SCHLAKE, R. L.; BUCKLEY, G. W.; MCPHERSON, G. Performance of third harmonic ground fault protection schemes for generator stator windings. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, 1981. PAS-100, n. 7, p. 3195–3202, 1981. ISSN 0018-9510.
- SCHLEEF, D.; HESS, F.; BRUYNINCKX, H. **The control and measurement device interface handbook**. 2005. 186 p.
- SHEPHERD, W.; ZHANG, L. **Power converter circuits**. New York: Marcel Dekker, 2004. 538 p. ISBN 0824750543.
- SIEMENS. **Manual proteção multifunção de máquina 7UM62**. [S.l.], 2000. 690 p.
- SILBERSCHATZ, A.; GALVIN, P. B.; GAGNE, G. **Operating system concepts**. 7. ed. [S.l.]: Wiley, 2004. ISBN 0471694665.
- SOUZA, G. P. de. **Unidade de condicionamento de sinais aplicada à plataforma PC104 focada ao desenvolvimento e execução de funções de proteção em sistemas elétricos**. 128 p. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) — Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2012.
- STANDARD, B. **BS 142-3-3.2: Eletrical protection relays. Requirements for single input energizing quantity relays. Specification for single input energizing quantity measuring relays with dependent specified time**. [S.l.], 1990.
- STEIN, M.; LINDERS, J. R. Ground fault protection of the complete generator winding. In: **Proceedings of the Pennsylvania Electric Association Relay Committee**. [S.l.: s.n.], 1977.
- STRANNEBY, D. **Digital signal processing: DSP and applications**. [S.l.]: Newnes, 2001. 229 p.

- SUBRAMANIAM, P.; MALIK, O. P. Digital simulation of a synchronous generator in direct phase quantities. **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**, 1971. v. 118, n. 1, p. 153–160, 1971.
- TAALAB, A.; DARWISH, H.; KAWADY, T. Ann-based novel fault detector for generator windings protection. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1999. v. 14, n. 3, p. 824–830, jul 1999. ISSN 0885-8977.
- TU, X. et al. A new model of synchronous machine internal faults based on winding distribution. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2006. v. 53, n. 6, p. 1818–1828, dez. 2006. ISSN 0278-0046.
- VETTERLI, M.; KOVAČEVIĆ, J. **Wavelets and subband coding**. New Jersey: Prentice Hall PTR Englewood Cliffs, 1995.
- VXWORKS. **Wind river systems home page**. 2013. Disponível em: <[http://www-windriver.com](http://www.windriver.com)>.
- WITTEN, I. H.; FRANK, E. **Data mining: practical machine learning tools and techniques**. 2. ed. San Francisco: Elsevier Inc., 2005. ISBN 0120884070.
- XENOMAI. **Xenomai home page**. 2013. Disponível em: <<http://www.xenomai.org>>.
- YANG, W.; TAVNER, P.; WILKINSON, M. Condition monitoring and fault diagnosis of a wind turbine synchronous generator drive train. **IET Renewable Power Generation**, 2009. v. 3, n. 1, p. 1, 2009. ISSN 17521416.
- YIN, X. G. et al. Adaptive ground fault protection schemes for turbogenerator based on third harmonic voltages. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1990. v. 5, n. 2, p. 595–603, 1990.
- ZADEH, M. D.; SIDHU, T.; KLIMEK, A. FPAA-based mho distance relay considering cvt transient supervision. **IET Generation, Transmission & Distribution**, 2009. v. 3, n. 7, p. 616, 2009. ISSN 17518687.

Apêndices

Detalhes Construtivos de G_1^E

A Figura 95 mostra as etapas de montagem dos enrolamentos com derivações para aplicação de faltas de G_1^E . O enrolamento planejado mostrado na Figura 96 traz os detalhes do enrolamento de armadura do gerador síncrono modificado para inserção de faltas internas. Nesta são indicadas as posições físicas das derivações inseridas e a disposição dos sensores PTC.

(a) Bobinas e Derivações

(b) Montagem dos Enrolamentos

(c) Amarração dos Enrolamentos

(d) Montagem Final

Figura 95 – Etapas de Montagem de G_1^E

Regulador de Constante de Tempo

A resistência do campo de um GS de grande porte usado em usinas é, em p.u., muito menor do que a da máquina disponível. Isso resulta em uma constante de tempo transitória em vazio de eixo direto τ'_{do} comparativamente menor. Para mitigar essa questão e proporcionar uma simulação mais realística de um SEP, um sistema eletrônico chamado Regulador de Constante de Tempo (RCT) foi projetado por Runtz et al. (1973) para reduzir a resistência de campo efetiva, alterando deste modo a τ'_{do} para valores próximos de uma máquina de grande porte. A τ'_{do} natural de G_1^S é de 0,765 s, com o uso do RCT é possível aumentá-la para até 10 s.

A τ'_{do} é inversamente proporcional à resistência de campo que em máquinas de pequeno porte é comparativamente elevada. O objetivo do RCT é reduzir a resistência efetiva do circuito de campo da máquina síncrona resultando no desejado aumento da τ'_{do} . Esse GS tem um enrolamento adicional, chamado enrolamento sombra, nas mesmas ranhuras do enrolamento de campo. Durante transitórios, uma tensão é induzida no enrolamento sombra por causa do acoplamento magnético entre os dois enrolamentos. Essa tensão é comparada com um valor referência e a diferença, após amplificação, é usada para controlar a tensão efetiva sobre o enrolamento de campo de modo a produzir o mesmo efeito de uma resistência negativa no circuito. O circuito completo é mostrado na Figura 97. Nesta L_s e L_f representam as indutâncias e r_s e r_f são as resistências dos enrolamentos sombra e de campo, respectivamente, as correntes que circulam pelos enrolamentos de campo e sombra estão indicadas por i_f e i_s , e r_{fa} é a resistência que ajusta a constante de tempo desejada.

O funcionamento do RCT pode ser analisado pelo circuito equivalente simplificado mostrado na Figura 98.

Como o enrolamento sombra está disposto nas mesmas ranhuras e tem o mesmo número de espiras, pode-se afirmar que $L_f \approx L_s \approx M_{fs} = L$, na qual M_{fs} é indutância mútua entre L_s e L_f . Deste modo, a partir da Figura 98,

Figura 97 – Circuito do Regulador de Constante de Tempo

Figura 98 – Circuito Simplificado do Regulador de Constante de Tempo

$$V = (i_f - i_s)r_{fa} + i_fr_f + L\frac{di_f}{dt} - L\frac{di_s}{dt}, \quad (21)$$

$$= K\epsilon, \quad (22)$$

$$= K[V_1 - (i_f - i_s)r_{fa} + i_sr_s + L\frac{di_s}{dt} - L\frac{di_f}{dt}] - K(V_1 - V_R). \quad (23)$$

Como $K \gg 1$, $K + 1 \approx K$ e $r_{fa} \gg r_f/K$. Então a Equação 23 reduz a:

$$r_{fa}i_f + L\frac{di_f}{dt} - (r_s + r_{fa})i_s - L\frac{di_s}{dt} = V_R. \quad (24)$$

A resistência r_s do enrolamento sombra é alta comparada com r_{fa} e a Equação 24 pode ser simplificada para:

$$r_{fa}(i_f + \frac{L}{r_{fa}}\frac{di_f}{dt}) - r_s(i_s - \frac{L}{r_s}\frac{di_s}{dt}) = V_R. \quad (25)$$

Como $r_s \gg r_{fa}$, $L/r_{fa} \gg L/r_s$. A constante de tempo que é predominante na Equação 25 é $L/r_{fa} = \tau'_{do}$ ou

$$V_R = r_{fa}(i_f + \tau'_{do} \frac{di_f}{dt}). \quad (26)$$

Isso significa que variando V_R , pela mudança de R_3 ou da tensão de entrada do RCT a resposta de i_f terá a constante de tempo τ'_{do} a qual é ajustável através de r_{fa} .

Lógica *Fuzzy*

Os Sistemas *Fuzzy* podem ser definidos como um conjunto de ferramentas computacionais que buscam tratar as informações qualitativas e incertas, assim como o cérebro humano. Todavia o tratamento matemático requerido para a execução de tais procedimentos é complexo e muitas vezes não proporciona resultados satisfatórios (PATYRA; MLYNEK, 1996).

LF permite o tratamento de implicações lógicas seguindo regras naturais de raciocínio, analisando condições e estipulando conseqüências. É baseada na teoria dos conjuntos *Fuzzy* (GOMIDE; GUDWIN, 1994).

Um conjunto *Fuzzy* é definido como uma coleção de objetos cujo grau de pertinência ao conjunto varia entre zero e um. Formalmente, um conjunto *Fuzzy* é caracterizado por uma função de pertinência(FP) que mapeia os elementos do domínio de discurso U no intervalo unitário $[0, 1]$, ou seja:

$$A : U \rightarrow [0, 1]. \quad (27)$$

Assim, o valor $A(x)$ indica com que grau o elemento x pertence ao conjunto A . Um grau de pertinência 1 equivale ao clássico símbolo de pertinência $\in$ enquanto um grau de pertinência 0 equivale ao clássico símbolo $\notin$.

Um conceito relacionado com conjuntos *Fuzzy* é o de variável lingüística. Entende-se por variável um identificador que pode assumir um dentre vários valores. Deste modo, uma variável lingüística pode assumir um valor lingüístico dentre vários outros em um conjunto de termos lingüísticos. Cada termo lingüístico é caracterizado por uma função de pertinência. A expressão lingüística das variáveis tratadas se dá através de predicados mnemônicos, como “erro”, “temperatura” ou “variação da pressão”. É permitido ainda o uso de modificadores qualificadores: “pequeno positivo”, “muito grande negativo” ou “aproximadamente zero” (PEDRYCZ, 1993).

Em princípio, as funções de pertinência podem ser qualquer função que produza valores entre 0 e 1. Comumente estas são definidas como triangulares, trapezoidais, sigmóides ou gaussianas. Funções de pertinência do tipo singleton também são usadas. A Figura 99 mostra um conjunto de funções de pertinência do tipo trapezoidal para o exemplo da

temperatura da água.

Figura 99 – Exemplo de Funções de Pertinência

A definição satisfatória da quantidade e grau de sobreposição entre as funções de pertinência no universo de discurso é fundamental quando da aplicação de um sistema *Fuzzy*.

Para o emprego de Sistema *Fuzzy* (SF), têm-se três etapas: *Fuzzyficação*, Processo de Inferência e *Defuzzyficação* (JAMSHIDI; VADIEE; ROSS, 1993).

Em um sistema *Fuzzy* (seja um modelo *Fuzzy* de um processo ou um controlador *Fuzzy*) as funções de pertinência são responsáveis pela conversão das grandezas do domínio do mundo real, captadas por sensores, dispositivos computadorizados ou mesmo provenientes de outros segmentos do processo de controle, para números *Fuzzy*. Essa conversão, conhecida como *Fuzzificação*, é essencial para a atuação da máquina de inferência *Fuzzy*.

A etapa de inferência consiste em avaliar um conjunto de regras (a base de conhecimento) do tipo “Se-Então” que descrevem a dependência entre as variáveis lingüísticas de entrada e as de saída. Essas regras seguem o paradigma *modus ponens*, um mecanismo de inferência progressiva (ao contrário do *modus tollens*, regressivo, mais utilizado em sistemas especialistas), para fazer o mapeamento do conceito de implicação lógica, como pode-se observar abaixo:

$$\begin{array}{l} \text{Se } (u_1 \text{ é } A_{1,1}) \text{ e } \cdots \text{ e } (u_n \text{ é } A_{1,n}) \\ \vdots \qquad \qquad \qquad \vdots \qquad \qquad \qquad \vdots \\ \text{Se } (u_1 \text{ é } A_{m,1}) \text{ e } \cdots \text{ e } (u_n \text{ é } A_{m,n}) \end{array}$$

Sendo $u_1, \dots, u_n$ as entradas do sistema e $A_{1,1}, \dots, A_{m,n}$ os termos lingüísticos dessas variáveis, definidos como funções de pertinência que cobrem todo o universo de discurso.

A inferência consiste de dois passos: avaliação da premissa de cada regra (conjunção), através dos operadores t-norma, e em seguida a etapa de agregação, ponderando as diferentes conclusões das regras ativas sob o operador s-norma. Os operadores de t-norma e s-norma são normas e co-normas triangulares que fornecem métodos genéricos para as operações de intersecção e união em conjuntos *Fuzzy*. Alguns exemplos de t-normas são o produto e o operador de mínimo. Para as s-normas têm-se como exemplos o operador de máximo ou a soma drástica.

Um sistema *Fuzzy* contém um conjunto dessas regras, todas ativadas em paralelo. Assim, ele *raciocina* com inferência associativa paralela. Quando uma entrada é fornecida, o controlador dispara as regras paralelamente, com diferentes graus de ativação, para inferir um resultado ou saída.

Em algumas arquiteturas *Fuzzy*, após a inferência da ação a ser tomada, necessita-se de uma tradução do valor lingüístico para a variável numérica de saída, que pode representar funções como ajustar a posição de um botão ou acionar uma válvula. Este passo é conhecido como *Defuzzificação*. Como pode acontecer de saídas distintas serem acionadas num mesmo momento, com diferentes graus de ativação, deve-se encontrar o valor que melhor corresponda à distribuição de possibilidade da combinação dos conjuntos *Fuzzy* de saída.

Todo processo envolvido em um sistema *Fuzzy* é mostrado resumidamente pela Figura 100. Os valores numéricos provenientes da medição passam pelo processo de *Fuzzificação*, passando então a serem representados por valores lingüísticos. A base de conhecimento do SF encontra-se armazenada nas Regras *Fuzzy* do tipo “Se-Então”. O processo de inferência aplicado aos valores lingüísticos resulta em uma região de saída, também representadas por valores lingüísticos. Para que estes possam realmente ser utilizados é necessário o processo de *Defuzzificação*, o qual encontrará um valor numérico para a região de saída *Fuzzy*, representada em termos lingüísticos.

Figura 100 – Diagrama de um Sistema *Fuzzy*

Existe uma diversidade de aplicações que utilizam os SFs tanto para controle do processo, quanto em tomada de decisões, nas quais o caráter qualitativo é evidenciado. Como na proteção de transformadores (BARBOSA et al., 2007). Desta forma, o presente projeto aplicará esta metodologia como um ponderador qualitativo das diversas variáveis de entrada com o objetivo de proporcionar um algoritmo diferencial robusto e confiável frente ao aparecimento das correntes diferenciais, uma vez que estas não determinam a existência efetiva de faltas internas (REIMERT, 2006).