**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

Antonio Eduardo Ceolin Momesso

**Proteção Adaptativa de Relés de Sobrecorrente com
Lógica Fuzzy**

São Carlos

2017

Antonio Eduardo Ceolin Momesso

Proteção Adaptativa de Relés de Sobrecorrente com Lógica Fuzzy

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo,
para obtenção do título de Mestre em Ciências
- Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica.

Área de concentração: Sistemas Elétricos de Po-
tência

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Nobuhiro Asada

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

**São Carlos
2017**

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

- M732 Momesso, Antonio Eduardo Ceolin
Proteção Adaptativa de Relés de Sobrecorrente com Lógica Fuzzy / Antonio Eduardo Ceolin Momesso ; orientador Eduardo Nobuhiro Asada. – São Carlos, 2017.
135 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.
- Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas Elétricos de Potência – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2017.
1. Relé adaptativo. 2. Lógica *Fuzzy*. 3. Relé de sobrecorrente. I. Asada, Eduardo Nobuhiro, orient. II. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ANTÔNIO EDUARDO CEOLIN MOMESSO**.

Título da dissertação: "Proteção adaptativa de relés de sobrecorrente com lógica Fuzzy".

Data da defesa: 25/07/2017.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Eduardo Nobuhiro Asada**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Profa. Dra. **Fernanda Caseño Trindade Arioli**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

APROVADO

Prof. Dr. **Fujio Sato**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luis Fernando Costa Alberto**

AGRADECIMENTOS

A Deus, por minha vida, família e amigos.

Aos meus pais Aparecido e Ironês Momesso, pelo amor, apoio e incentivo incondicional.

A minha esposa Nathalia Rego, por estar sempre ao meu lado, me ajudando nos momentos difíceis.

Ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Asada pela orientação, dedicação e apoio na elaboração deste trabalho.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao auxílio FAPESP (2014/27342-1) pelo apoio no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos meus amigos e aos meus companheiros de laboratório, Benvindo, Diego, Eduardo, Eleandro, Ellen, Fillipe, Mohamad, Wellington e tantos outros, pelos conhecimentos e momentos compartilhados e pelos apoios dado.

Aos demais professores do Departamento de Engenharia Elétrica, pelos conhecimentos e orientações transmitidos ao longo do curso.

*“A mudança é a lei da vida. E aqueles que apenas olham para o passado ou para o presente
irão com certeza perder o futuro.”*
John Kennedy

RESUMO

Momesso, A. E. C. **Proteção Adaptativa de Relés de Sobrecorrente com Lógica Fuzzy.** 2017. 135p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

O avanço tecnológico e a modernização do sistema elétrico de potência trouxeram vários benefícios para uma operação mais robusta. Neste avanço tecnológico surgiram os relés digitais baseados em microprocessador que possuem diversas funcionalidades, dentre elas o ajuste imediato de seus parâmetros. Tal função permite adotar vários ajustes conforme alterações na rede. Porém, realizar a correção dos parâmetros do dispositivo de proteção de sobrecorrente de forma manual, não apenas torna a rede mais vulnerável a falhas humanas, diminuindo a segurança, como também pode ser inviável dependendo do tamanho do sistema. Portanto, um sistema automático seria uma solução para essa dificuldade. Desta forma, este trabalho propõe um ajuste adaptativo, por meio da Lógica *Fuzzy*, da corrente de *pick-up* do relé de sobrecorrente. Para tanto, duas variáveis foram levadas em consideração, a corrente pré-falta e a variação da corrente, onde, através da regra de inferência *fuzzy*, foram definidos diversos conjuntos de termos da variável corrente de *pick-up* (saída). A implementação e simulação deste equipamento foram realizadas no *software Alternative Transients Program - The Electromagnetic Transients Program* (ATP-EMTP) tendo em vista se tratar de uma plataforma computacional de livre acesso e utilização a todos aqueles que se interessem pelo tema. Neste trabalho, foram implementados os relés de sobrecorrente temporizados de tempo inverso e instantâneo, com e sem a unidade direcional. Também foi elaborado um sistema de teleproteção para realizar a coordenação dos equipamentos. Uma vez estruturados tais modelos, foram feitos estudos em sistemas teste do IEEE no sentido de demonstrar e avaliar o desempenho dos relés implementados. Os resultados obtidos mostraram as vantagens da utilização do sistema *fuzzy* implementado, uma vez que ele é capaz de eliminar diferentes tipos de faltas, além de aumentar a velocidade de atuação em sistemas com geração intermitente e com variação de carga.

Palavras-chave: Relé adaptativo. Lógica *Fuzzy*. Relé de sobrecorrente.

ABSTRACT

Momesso, A. E. C. **Adaptive Protection of Overcurrent Relays with Fuzzy Logic**. 2017. 135p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

The technological advance and modernization of the electric power system have brought several benefits for a more robust operation. In this technological advance, microprocessor-based digital relays have emerged with several functionalities, among them the real-time adjustment of their parameters. This function allows to make various adjustments according to changes in the network. However, performing the correction of the overcurrent protection device parameters manually, not only makes the network more vulnerable to human failure, but also may be unfeasible depending on the size of the system. Therefore, an automatic system would be a solution to this difficulty. In this way, this work proposes an adaptive adjustment, through the Fuzzy Logic, of the pick-up current of the overcurrent relay. For that, two variables were taken into account, the pre-fault current and the current variation, in which, through the fuzzy inference rule, several sets of terms of the current variable of pick-up (output) were defined. The implementation and simulation of this equipment was carried out in the software Alternative Transients Program - The Electromagnetic Transients Program (ATP-EMTP) in order to be a computer platform of free access and use to all those who are interested in the subject. In this work, the inverse time and instantaneous overcurrent relays were implemented, with and without the directional unit. A teleprotection system was also developed to carry out equipment coordination. Once these models were structured, studies were done on IEEE test systems in order to demonstrate and evaluate the performance of the implemented relays. The results have confirmed the advantages on the use of fuzzy system, since it was able to eliminate different types of faults, besides increasing the speed of operation in systems with intermittent generation and with variation of load.

Keywords: Adaptive relay. Fuzzy Logic. Overcurrent relay.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Relação do carregamento e tempo de eliminação de falta.	32
Figura 2.2 – Zonas de proteção primária em um sistema elétrico genérico.	33
Figura 2.3 – Proteção principal, retaguarda local e retaguarda remota.	33
Figura 2.4 – Componentes do sistema de proteção.	34
Figura 2.5 – Arquitetura do relé digital de sobrecorrente.	37
Figura 2.6 – Curva característica de tempo inverso.	40
Figura 2.7 – Curva característica de tempo inverso segundo IEC 60255-3.	41
Figura 2.8 – Curva característica de tempo inverso segundo padrão ANSI.	42
Figura 2.9 – Diagrama vetorial para polarização em quadratura	44
Figura 2.10–Características do relé de sobrecorrente direcional de neutro.	44
Figura 2.11–Diagrama vetorial para polarização de sequência zero	45
Figura 2.12–Exemplo da utilização de relés direcionais de sobrecorrente.	46
Figura 3.1 – Diagrama do sistema <i>fuzzy</i>	53
Figura 3.2 – Corrente no secundário do TC, corrente medida, corrente de pré-falta e variação da corrente.	56
Figura 3.3 – Função de pertinência de referência.	57
Figura 3.4 – Região <i>fuzzy</i> de saída agregada.	60
Figura 3.5 – Variação da corrente de <i>pick-up</i> perante variação da corrente do sistema elétrico.	61
Figura 3.6 – Variação da corrente de <i>pick-up</i> perante uma falta no sistema elétrico.	61
Figura 3.7 – Estrutura do relé implementado na linguagem MODELS.	62
Figura 3.8 – Arquitetura da lógica de atuação, direcionalidade e teleproteção.	69
Figura 3.9 – Tensão do sistema elétrico e tensão de saída do filtro de memória de tensão.	71
Figura 3.10–Lógica aplicada na teleproteção. <i>Rec.</i> e <i>Transm.</i> são blocos receptores e transmissores, respectivamente.	73
Figura 4.1 – Sistema teste utilizado no Estudo 1.	77
Figura 4.2 – Correntes da fase A no secundário dos TCs dos Relés 1 e 2 - sistema sem defeito.	78
Figura 4.3 – Correntes da fase A no secundário dos TCs, correntes de <i>pick-up</i> e sinais de <i>trip</i> dos Relés 1 e 2 com o sistema <i>fuzzy</i>	79
Figura 4.4 – Correntes de <i>pick-up</i> e sinais de <i>trip</i> dos Relés 1 e 2 sem o sistema <i>fuzzy</i>	79
Figura 4.5 – Correntes de <i>pick-up</i> e sinais de <i>trip</i> dos Relés 1 e 2 com <i>pick-up</i> em 10 A (Relé 1 e 2).	80
Figura 4.6 – Correntes de <i>pick-up</i> e sinais de <i>trip</i> dos Relés 1 e 2 - corrente de carga de 80 A.	81
Figura 4.7 – Correntes de <i>pick-up</i> e sinais de <i>trip</i> dos Relés 1 e 2 - corrente de carga de 250 A.	81
Figura 4.8 – Sistema teste utilizado no Estudo 2.	82

Figura 4.9 – Efeitos do parâmetro W no tempo de atuação com $I_r=4,00$ e $MT=0,50$. . .	84
Figura 4.10–Valores da tensão do Relé 6 e sinal de <i>trip</i> dos Relés 6 (vermelho) e 7 (verde). . .	86
Figura 4.11–Correntes da fase A no secundário dos TCs, correntes de <i>pick-up</i> e sinais de <i>trip</i> dos Relés 4, 5 e 7 com o sistema <i>fuzzy</i> e $W=1,50$	88
Figura 4.12–Valores da corrente de <i>pick-up</i> e da corrente medida pelo relé (Fase B), velocidade, torque e corrente do motor de 125 HP (Fase B), bem como o sinal de <i>trip</i> - relé atuando.	91
Figura 4.13–Valores da corrente de <i>pick-up</i> e da corrente medida pelo relé (Fase B), velocidade, torque e corrente do motor de 100 HP (Fase B), bem como o sinal de <i>trip</i> - relé não atuando.	92
Figura 4.14–Sistema teste utilizado no Estudo 3.	93
Figura 4.15–Tempo da aplicação da falta e sinais de <i>trip</i> dos relés R2, R4, R5, R6, R7 e R13. . .	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Curvas existentes da norma <i>IEC 60255-3</i>	41
Tabela 2.2 – Constantes da curva de atuação padrão <i>ANSI</i>	42
Tabela 2.3 – Alimentação dos relés direcionais de sobrecorrente	43
Tabela 3.1 – Resumo das regras <i>fuzzy</i> adotadas	55
Tabela 3.2 – Parâmetros da variável corrente de pré-falta do sistema <i>fuzzy</i>	56
Tabela 3.3 – Parâmetros da variável variação da corrente do sistema <i>fuzzy</i>	57
Tabela 3.4 – Parâmetros da variável corrente de <i>pick-up</i> do sistema <i>fuzzy</i>	57
Tabela 3.5 – Constantes do filtro Butterworth	64
Tabela 4.1 – Dados da carga - Estudo 2	83
Tabela 4.2 – Tempo de coordenação dos relés com o sistema <i>fuzzy</i>	85
Tabela 4.3 – Tempo de operação dos relés com o sistema <i>fuzzy</i>	85
Tabela 4.4 – Tempo de operação dos relés sem o sistema <i>fuzzy</i>	86
Tabela 4.5 – Tempo de operação do Relé 7 com e sem o sistema <i>fuzzy</i>	87
Tabela 4.6 – Tempo de operação dos relés com o sistema <i>fuzzy</i> perante variação da resistência de falta	88
Tabela 4.7 – Potência máxima do motor que pode ser inserido no sistema	90
Tabela 4.8 – Dados da carga - Estudo 3	94
Tabela 4.9 – Múltiplos de tempo utilizados nos relés com Lógica <i>Fuzzy</i>	94
Tabela 4.10–Dados do sistema de proteção	95
Tabela 4.11–Tempo de atuação para faltas <i>Close-in</i> (Relé primário e relé secundário) e <i>ITC</i> - Relés com o sistema <i>fuzzy</i> e a teleproteção	95
Tabela 4.12–Dados utilizados nos relés sem o sistema <i>fuzzy</i>	96
Tabela 4.13–Tempo de atuação para faltas <i>Close-in</i> (Relé primário e relé secundário) e <i>ITC</i> - Relé convencional	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>ANSI</i>	<i>American National Standards Institute</i>
<i>ATP</i>	<i>Alternative Transients Program</i>
<i>ATP-EMTP</i>	<i>Alternative Transients Program - The Electromagnetic Transients Program</i>
A/D	Analogico/Digital
<i>EMTP</i>	<i>The Electromagnetic Transients Program</i>
<i>EPSO</i>	<i>Evolutionary Particle Swarm Optimization</i>
GD	Gerador Distribuído
<i>IEC</i>	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	Instituto de Engenheiro Eletricistas e Eletrônicos
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
p.u.	Por Unidade
RP	Relé Primário
RS	Relé Secundário
SEP	Sistema Elétrico de Potência
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial

LISTA DE SÍMBOLOS

b	Quantidade de bits da palavra menos um
C_{max}	Conjugado máximo
D	Disjuntor
F	Ponto de falta
$\dot{F}_{re}$	Parte real do fasor
$\dot{F}_{im}$	Parte imaginária do fasor
I_{cc}	Corrente de curto-circuito
$I_{cc_{min}}$	Corrente de curto-circuito mínima
I_p	Corrente de <i>pick-up</i>
I_{pri}	Corrente do primário do TC
I_r	Razão entre a corrente de curto-circuito e a corrente de <i>pick-up</i>
I_{sec}	Corrente do secundário do TC
ITC	Intervalo de tempo de coordenação
I_0	Corrente de sequência zero
$I>$	Unidade de sobrecorrente
k	Fator de sensibilidade
k_{op}	Quantidade de amostras processadas até que o relé opere
k_1	Constante da curva de tempo do relé
k_2	Constante da curva de tempo do relé
k_3	Constante da curva de tempo do relé
k_4	Constante da curva de tempo do relé
M	Motor
Ma	Quantidade de elementos que contém graus de pertinência máximos
M_d	Constante de decaimento em número de ciclo

MT	Múltiplo de tempo
N	Número de amostras por ciclo
N_d	Número de pontos de discretização
PF	Ponto flutuante
Res	Resolução do Conversor A/D
R_{sec}	Resistor no secundário do Transformador Auxiliar
R_{TC}	Relação de transformação do TC
R_{TP}	Relação de transformação do TP
R_X	Relação de transformação do TP ou TC
$S_{3\phi}$	Potência aparente trifásica
t_a	Tempo de atuação do relé
$T(k)$	Valor da variável T para o k -ésimo ponto de discretização
t_{pri}	Tempo de atuação do relé primário
t_{sec}	Tempo de atuação do relé secundário remoto
$\dot{V}$	Vetor da tensão de entrada
V_{cc}	Tensão de curto-circuito
$\dot{V}_m$	Vetor da tensão de saída do filtro de memória de tensão
$V_{m_{saida}}$	Tensão máxima de saída do Transformador Auxiliar
V_{pol}	Tensão de polarização
V_{pri}	Tensão do primário do TP
V_{saida}	Tensão de saída do Transformador Auxiliar
V_{sec}	Tensão do secundário do TP
V_0	Tensão de sequência zero
X	Entrada de tensão do Conversor A/D
X_{pri}	Tensão ou corrente de pico máxima do sistema elétrico
X_{sec}	Tensão ou corrente do secundário do Transdutor

W	Constante da equação tempo-corrente-tensão
Y	Valor de pico da onda de entrada
Z_f	Impedância equivalente de falta
Z_{10}	Valor digitalizado inteiro na base 10
α	Fator de esquecimento
δ	Defasagem angular
Δt_{amos}	Intervalo de amostragem
μ	Grau de pertinência
τ	Ângulo de máximo torque
χ_k	Valor da amostra para a k -ésima posição

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	Considerações Iniciais	27
1.2	Estado da Arte	28
1.3	Estrutura do Trabalho	29
2	FUNDAMENTOS DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DO SISTEMA ELÉ- TRICO	31
2.1	Considerações Iniciais	31
2.2	Termos Empregados no Sistema de Proteção	31
2.3	Conceitos Gerais do Sistema de Proteção	34
2.4	Proteção Digital	36
2.4.1	Benefícios do Uso da Proteção Digital	36
2.4.2	Arquitetura do Relé Digital	37
2.4.3	Proteção Adaptativa	38
2.5	Relé de Sobrecorrente	39
2.5.1	Sobrecorrente Instantâneo	39
2.5.2	Sobrecorrente Temporizado	39
2.6	Relé Direcional de Sobrecorrente	42
2.7	Proteção de Linhas de Transmissão	45
2.8	Proteção de Linhas de Distribuição	47
2.9	Teleproteção	48
2.10	Considerações Finais	49
3	IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO RELÉ DE SOBRECOR- RENTE COM LÓGICA <i>FUZZY</i>	51
3.1	Considerações Iniciais	51
3.2	<i>Software</i> ATP	51
3.2.1	ATPDraw	51
3.2.2	Linguagem MODELS	52
3.3	Lógica <i>Fuzzy</i>	52
3.3.1	Lógica <i>Fuzzy</i> aplicada ao Relé de Sobrecorrente	55
3.4	Modelagem do Relé e Periféricos	61
3.4.1	Transdutores	62
3.4.2	Transformadores Auxiliares	63
3.4.3	Filtro Analógico	64
3.4.4	Grampeador	64

3.4.5	<i>Sampler/Holder</i>	65
3.4.6	Conversor Analógico/Digital	65
3.4.7	<i>Buffer</i>	66
3.4.8	Estimador de Fasor	67
3.4.9	Lógica de Atuação / Direcionalidade / <i>Trip</i> / Teleproteção	68
3.4.9.1	Lógica de Atuação	68
3.4.9.2	Direcionalidade	70
3.4.9.3	<i>Trip</i>	72
3.4.9.4	Teleproteção	73
3.4.10	Período Zero da Corrente	73
3.5	Considerações Finais	75
4	ESTUDOS DE CASOS	77
4.1	Considerações Iniciais	77
4.2	Especificações e Simulações dos Sistemas	77
4.2.1	Estudo 1	77
4.2.2	Estudo 2	82
4.2.2.1	Comparação entre o tempo de atuação com e sem o sistema <i>fuzzy</i> .	84
4.2.2.2	Variação da resistência de falta	87
4.2.2.3	Comportamento do sistema <i>fuzzy</i> perante a energização de motores	90
4.2.3	Estudo 3	92
4.3	Considerações Finais	97
5	CONCLUSÃO	99
	REFERÊNCIAS	103
	APÊNDICES	107
	APÊNDICE A – MODELS UTILIZADAS NA IMPLEMENTAÇÃO DO RELÉ DE SOBRECORRENTE COM LÓGICA FUZZY TEMPORIZADO DE TEMPO INVERSO DIRECIO- NAL COM TELEPROTEÇÃO	109
A.1	Transdutores	109
A.2	Transformador Auxiliar	110
A.3	Filtro Analógico	110
A.4	Grampeador	111
A.5	<i>Sampler/Holder</i>	112
A.6	Conversor Analógico/Digital	112

A.7	<i>Buffer</i>	114
A.8	Estimador de Fasor	115
A.9	Lógica de Atuação / Direcionalidade / <i>Trip</i> / Teleproteção	118
A.10	Período Zero da Corrente	134

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

A crescente demanda de energia elétrica, nos mais diversos setores da sociedade, faz com que seja necessário construir um complexo sistema através do qual a energia é gerada, transmitida e distribuída. Com o aumento de investimento neste setor, se torna essencial que medidas de precaução sejam tomadas para garantir que os equipamentos trabalhem o mais próximo possível da sua capacidade máxima, porém de forma a evitar acidentes. Desta maneira, é de extrema importância o estudo de técnicas, cada vez mais avançadas, para manter e operar o sistema de modo seguro. Neste contexto aparecem os sistemas de proteção que têm como objetivo principal manter a integridade do sistema elétrico mediante o aparecimento de faltas, garantindo, assim, além da segurança das pessoas, a continuidade do serviço da porção não envolvida no problema. Portanto, os dispositivos de proteção devem possuir uma boa seletividade e coordenação, visando um menor tempo de resposta às faltas, além de uma boa sensibilidade e confiabilidade, de maneira a proteger uma maior zona de proteção.

Dentro dos sistemas de proteção, o relé assume uma posição de destaque devido a sua importância funcional. Dentre os mais diversos tipos de relés, os relés de sobrecorrente são os que possuem uma utilização mais simples e econômica, além de serem um dos tipos de relés mais usados na proteção do sistema elétrico. A atuação deste tipo de relé depende exclusivamente da magnitude da corrente elétrica.

Entre as diversas necessidades para a aplicação dos relés, pode-se destacar aquelas voltadas à proteção de linhas de transmissão e distribuição. Em tal proteção, os ajustes dos relés são determinados a partir de estudos de curtos-circuitos em regime permanente de maneira a obter a melhor coordenação e seletividade entre os equipamentos que compõem o sistema de proteção. Porém, em alguns casos, é necessário estabelecer mais de um ajuste, para o mesmo parâmetro do relé, a fim de contemplar todas as condições de contingências em que o sistema elétrico possa estar submetido. Contudo, tais ajustes só são possíveis graças ao advento dos relés digitais com *softwares* adequados e com capacidade de comunicação, onde os microprocessadores facilitam a adaptação e adequação dos múltiplos grupos de ajustes (CODLING et al., 1996).

Neste sentido, aparecem as proteções adaptativas que, como o próprio nome sugere, se adaptam às variações que ocorrem no sistema elétrico. Tais relés têm como objetivo alterar seus ajustes automaticamente de maneira a evitar que essas alterações sejam feitas de forma manual, o que evita falhas humanas do tipo esquecimento ou erro na escolha do grupo de ajuste. Como consequência dessas falhas, pode-se citar: desligamento de grandes blocos de carga por falta de coordenação; danos aos equipamentos devido a uma corrente muito elevada por um grande período de tempo; equipamentos inativos por um período de tempo elevado; entre outros.

É nesse contexto que se encaixa o presente trabalho, cujo principal propósito é apresentar, implementar e analisar o desempenho de um relé de sobrecorrente com a Lógica *Fuzzy* alterando o valor da corrente de *pick-up*. Para tanto, utilizou-se do *software Alternative Transients Program - The Electromagnetic Transients Program (ATP-EMTP)* que, além de proporcionar estudos no domínio do tempo é bastante utilizado tanto no meio acadêmico quanto no meio empresarial.

Como será visto ao longo dos próximos capítulos, o relé implementado tem como característica um processamento descentralizado, ou seja, não há a necessidade de comunicação entre os relés, além de se adaptar às mudanças de carga e à inserção ou retirada de Geradores Distribuídos (GDs) sem que haja nenhuma intervenção humana. Assim, as dificuldades obtidas devido a mudança das características do sistema elétrico em função do tempo (por exemplo: alterações de carga, localização, tipo e quantidade de geração), acabam não ocorrendo quando este dispositivo é utilizado. Ademais, o relé de sobrecorrente com Lógica *Fuzzy* apresenta como diferencial dos relés convencionais uma melhor sensibilidade e um tempo de abertura menor, o que proporciona um aumento da potência transportada pelo sistema elétrico sem que haja novos investimentos na geração, tendo em vista uma maior estabilidade das máquinas operando em paralelo.

1.2 Estado da Arte

No âmbito dos relés utilizando a Lógica *Fuzzy* pode-se citar a referência Kumar et al. (2015) que utiliza de um módulo de interferência *fuzzy*, juntamente com um módulo de aprendizagem em rede neural, para decidir os ajustes ótimos da proteção perante as mudanças da rede elétrica. Também a referência Rebizant et al. (2010) utiliza a Lógica *Fuzzy* para adaptar a restrição percentual do relé diferencial. Eles conseguiram combinar os pontos fortes da proteção diferencial de módulo e ângulo de fase da corrente, o que resultou em melhorias de desempenho para casos de faltas externas com o Transformador de Corrente (TC) saturado.

Em Mahat et al. (2011) é proposta uma proteção adaptativa de sobrecorrente em sistemas com GDs, de maneira que as características de disparo do relé são atualizadas conforme a operação do GD (conectado à rede ou ilhado). Desta forma, o relé detecta o status do sistema usando algoritmos de detecção de estado e seleciona as características de disparo mais apropriada. Já em Coffele, Booth e Dysko (2015) a proteção adaptativa é utilizada em sistemas com GDs e com gerenciamento de rede ativa (*active network management*). Neste trabalho foi utilizado de técnicas próprias para determinar os ajustes dos relés. Desta forma, obteve-se uma redução de operações falsas bem como no tempo de operação do sistema de proteção.

Em Silveira et al. (2010) é proposto um sistema automático de seleção do grupo de ajuste do relé perante mudanças topológicas do sistema elétrico através de um sistema baseado em Redes de Petri Coloridas. Já em Mostafa e Aly (2009) é proposto o mesmo problema, porém utilizando Redes Neurais Artificiais. Em ambos os trabalhos a coordenação se mostrou eficiente para diferentes tipos e localização de faltas.

No contexto da simulação de relés no programa *ATP-EMTP*, pode-se citar as dissertações de Alvarenga (2014) e Vianna (2013), que apresentam uma modelagem detalhada da proteção diferencial de barramento, e de Tavares (2013), que apresenta uma modelagem da proteção diferencial de transformadores de potência. Tais dissertações foram de grande valia na modelagem da arquitetura do relé digital no programa *ATP-EMTP*. Também pode-se citar a referência Conceicao e Silva (2015) que faz a modelagem e simulação dos dispositivos de proteção existentes numa rede de distribuição real. Neste trabalho é feito um estudo de coordenação e desempenho dos relés de sobrecorrente, religadores, seccionadores e fusíveis. Ademais, em Liu et al. (2011) são apresentados alguns testes de desempenho dos relés de proteção digitais no programa *ATP-EMTP*. Também em Aguiar, Santo e Monaro (2016) são feitas modelagens de relés digitais de proteção para uso no *software ATP-EMTP* utilizando a biblioteca OpenRelay.

1.3 Estrutura do Trabalho

Para alcançar os objetivos propostos, além deste capítulo introdutório, esta dissertação de mestrado será estruturada de acordo com os seguintes capítulos:

- O Capítulo 2 tem como objetivo iniciar os estudos situando o leitor a respeito dos termos e conceitos empregados no sistema de proteção. Posteriormente será realizado um estudo sobre a proteção digital, onde serão mostrados os benefícios de seu uso, tal como a sua arquitetura. Também será comentado sobre a filosofia da proteção adaptativa e em seguida será evidenciada a proteção de linhas de transmissão e distribuição. Ademais, seções sobre relés de sobrecorrente, elemento direcional e teleproteção também se farão presentes.
- O Capítulo 3 tem como objetivo principal explicar como foi concebida a Lógica *Fuzzy* utilizada neste trabalho e como esta foi aplicada no relé de sobrecorrente. Além disso, também será detalhada a arquitetura do relé digital de sobrecorrente no programa *ATP-EMTP*, bem como o emprego da direcionalidade e teleproteção neste dispositivo.
- O Capítulo 4 tem como principal meta apresentar um estudo do desempenho operacional do relé de sobrecorrente com a Lógica *Fuzzy* alterando o valor da corrente de *pick-up*. Para se realizar a análise de desempenho, serão realizadas simulações com sistemas elétricos, em que serão variadas a carga, a geração, a impedância de falta, além da verificação do desempenho perante a energização de motores.
- O Capítulo 5 tem por objetivo apresentar uma conclusão geral do trabalho como um todo, bem como as principais constatações alcançadas em cada um dos capítulos anteriores de modo que se permita sintetizar o que foi apresentado. Além disso, são ressaltados os objetivos alcançados bem como os trabalhos futuros no tema.

2 FUNDAMENTOS DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO

2.1 Considerações Iniciais

O objetivo de um sistema elétrico é gerar e fornecer energia elétrica para os consumidores. Para tanto, o sistema deve ser dimensionado e gerenciado a fim de fornecer sua energia para os mais diversos pontos de utilização de forma confiável e econômica. Uma frequente ou prolongada falta de energia elétrica pode causar colapso na rotina da sociedade, o que evidencia a necessidade da confiabilidade e segurança no fornecimento de energia. Desta maneira, a proteção do sistema elétrico deve ser capaz de isolar, de forma rápida e eficaz, os distúrbios ocasionados por curtos-circuitos, minimizando assim, os custos de reparação dos estragos, a probabilidade do defeito se propagar e envolver outros equipamentos, o tempo do equipamento ficar inativo, entre outros.

Neste capítulo será dado início aos estudos dos relés de sobrecorrente, foco deste trabalho. Todavia, antes de entrar neste contexto especificamente, será feita uma breve apresentação dos termos e conceitos utilizados no sistema de proteção, bem como os benefícios e a arquitetura dos relés digitais. Posteriormente, serão apresentados os relés empregados na proteção de linhas de transmissão e distribuição, onde será dado maior foco na proteção realizada pelos relés de sobrecorrente. Por fim, será explicado a respeito da teleproteção, mostrando os benefícios do seu uso.

2.2 Termos Empregados no Sistema de Proteção

Buscando um maior esclarecimento sobre os termos empregados neste trabalho, esta seção tem como objetivo apresentar algumas definições utilizadas pela literatura no que se refere ao sistema de proteção, dos quais sensibilidade, velocidade de atuação, confiabilidade e seletividade são características essenciais aos sistemas de proteção (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI, 2011).

- Sensibilidade: é a capacidade de resposta às anormalidades ocorridas durante a operação do sistema elétrico e aos curtos-circuitos para os quais o relé foi projetado. Para tanto, existe um fator de sensibilidade que é dado conforme a Equação 2.1.

$$k = \frac{I_{cc_{min}}}{I_p} \quad (2.1)$$

onde k é o fator de sensibilidade, $I_{cc_{min}}$ é a corrente de curto-circuito para o ponto mais afastado da seção da linha e sob condições de geração mínima e I_p é a corrente de *pick-up* ou a menor corrente de acionamento do relé. Um valor comum a este fator é entre 1,5 e 2,0 (CAMINHA, 1977).

- **Velocidade de Atuação:** pode ser definida como o tempo de resposta do relé. Assim, busca-se remover a falta no menor tempo possível visando, além da proteção do sistema elétrico, auxiliar a manutenção da estabilidade das máquinas operando em paralelo; minimizar o tempo de desligamento; assegurar a operação normal nas partes não envolvidas pela falta; entre outras.

É evidente que, para obter um tempo de atuação pequeno, deve-se associar relés rápidos a disjuntores rápidos. Assim, com o aumento da velocidade de atuação, consegue-se um acréscimo da carga transportada sobre o sistema, sem perda de sincronismo quando da ocorrência de curto-circuito, resultando em uma maior economia global conforme pode ser observado na Figura 2.1 (CAMINHA, 1977).

Figura 2.1: Relação do carregamento e tempo de eliminação de falta.

- **Confiabilidade:** indica a probabilidade do relé satisfazer sua função sob dadas circunstâncias, ou seja, operar somente em condições para as quais foi projetado. Caso ele opere somente para curtos-circuitos dentro da sua zona de proteção, o relé também pode ser considerado seguro (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI, 2011).
- **Seletividade:** está relacionada à propriedade da proteção em reconhecer e selecionar entre a condição de uma imediata operação e a condição de uma operação com retardo ou não operação. Desta forma, é garantido que o relé só irá operar para a zona de proteção a qual foi projetado (CAMINHA, 1977).
- **Zona de Proteção:** é a área limite de uma porção ou equipamento do sistema elétrico que determinado relé tem como responsabilidade de proteção. De uma maneira geral, todos os elementos do sistema devem estar ao menos em uma zona e as zonas de proteção podem sobrepor-se de tal maneira a atender este requisito e não criar nenhum ‘ponto cego’ no sistema de proteção (PHADKE; THORP, 2009).
- **Relé Primário (Principal):** são relés responsáveis por operar, no menor tempo possível e de maneira seletiva, devido à falta dentro da sua zona de proteção.

Figura 2.2: Zonas de proteção primária em um sistema elétrico genérico.

- **Relé Secundário (Retaguarda):** são relés responsáveis por operar devido à manutenção ou falha do relé principal. Podem ser classificados em proteção de retaguarda local ou remota. Conforme mostra a Figura 2.3, a proteção de retaguarda local, também conhecida como proteção de falha de disjuntor, pode ou não compartilhar os mesmos elementos do sistema de proteção primário. Já a proteção de retaguarda remota não compartilha nenhum elemento do sistema de proteção principal, além de remover elementos adicionais do sistema elétrico (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI, 2011).

Figura 2.3: Proteção principal, retaguarda local e retaguarda remota.

- **Intervalo de Tempo de Coordenação:** é o tempo de espera para a atuação do relé de retaguarda, ou seja, considerando dois elementos de proteção (relé principal e relé de retaguarda) dispostos em série, caso o elemento mais próximo da falta (relé principal) falhe

ao eliminar uma falta a jusante do mesmo, o elemento a montante (relé de retaguarda) deve atuar respeitando um determinado intervalo de tempo (Equação 2.2). Segundo Mansour, Mekhamer e El-Kharbawe (2007) o intervalo utilizado para os relés eletromecânicos é da ordem de 0,3 a 0,4 s, enquanto para os relés de proteção baseados em microprocessadores é da ordem de 0,1 a 0,2 s.

$$t_{sec} - t_{pri} \geq ITC \quad (2.2)$$

onde t_{sec} é o tempo de atuação do relé secundário remoto, t_{pri} é o tempo de atuação do relé primário para o mesmo ponto de falta do relé secundário e ITC é o intervalo de tempo de coordenação.

- *Pick-up*: valor que define a menor grandeza (tensão, corrente, etc.) que é possível a atuação do relé, ou seja, é a partir deste valor que o relé entra em operação.
- Sinal de *Trip*: sinal enviado pelo relé ao disjuntor para que o mesmo realize a abertura do circuito elétrico no qual está inserido.

2.3 Conceitos Gerais do Sistema de Proteção

Como o sistema elétrico não é imune a falhas, tanto de causa interna (defeitos em equipamentos, sobrecarga, etc.), quanto de causa externa (tempestades, vandalismo, etc.), há a necessidade de utilizar um sistema de proteção com a finalidade de minimizar os danos que podem ocorrer nos seus componentes, garantindo assim, uma qualidade de serviço e um prolongamento da vida útil das instalações. Desta forma, os principais propósitos do sistema de proteção são: (i) proteção do sistema elétrico, visando manter a continuidade do fornecimento de energia elétrica; (ii) evitar ou diminuir os danos aos equipamentos; (iii) garantir a integridade física dos usuários e operadores do sistema elétrico (HEWITSON; BROWN; BALAKRISHNAN, 2004).

O sistema de proteção é um arranjo completo de equipamentos de proteção e periféricos necessários para o cumprimento de sua função (IEC, 1984). Ele é constituído de subsistemas conforme pode ser observado na Figura 2.4. Desta maneira, ele é composto basicamente: (i)

Figura 2.4: Componentes do sistema de proteção.

pelos Transformadores de Corrente (TCs) e Transformadores de Potencial (TPs) que, além de serem responsáveis, respectivamente, pela redução da corrente e da tensão para níveis aceitáveis aos equipamentos, também proporcionam a função de separar eletricamente os dispositivos conectados a eles do restante do sistema elétrico; (ii) pelos relés de proteção cuja essência baseia-se em um comparador que, conforme os dados aquisitados do sistema elétrico e o *pick-up*, enviam comandos para os disjuntores; (iii) pelos disjuntores que são responsáveis por receber o sinal de *trip* dos relés e isolar a área afetada do restante do sistema; (iv) pela bateria que é responsável por fornecer energia elétrica ao sistema de proteção no momento da falta (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI, 2011).

Uma das principais características desejada e esperada do sistema de proteção é o tempo de isolamento da falta que é dado pela soma dos tempos de processamento (comparação e decisão) e abertura do disjuntor (ação). Quanto menor o tempo de isolamento, ou seja, quanto maior a velocidade de atuação da proteção, menor serão os danos causados ao sistema elétrico, haja vista que a energia liberada durante a falta é proporcional ao produto do quadrado da corrente de falta pelo tempo de duração da falha. Assim, a resposta do sistema de proteção deve ser automática, rápida e precisa. Cada dispositivo de proteção deve possuir alguma restrição, permitindo que o mesmo só seja sensível às faltas próximas a ele e dentro da sua zona de atuação, visando assim, manter a seletividade do sistema de proteção.

A fim de preencher os requisitos do sistema de proteção para diversas configurações, condições operacionais e características de construção do sistema elétrico, tornou-se necessário o desenvolvimento de diferentes modelos de relés para atender tais requisitos. Dentre os diversos tipos de relés empregados no sistema de proteção, os mais comuns podem ser categorizados conforme a seguir (PHADKE; THORP, 2009).

- a) Relés de Magnitude: reagem à magnitude da grandeza de entrada podendo atuar para valores acima ou abaixo do *pick-up*. Como exemplo, pode-se citar os relés de sobrecorrente que respondem às variações da magnitude das correntes.
- b) Relés Direcionais: distinguem o sentido da corrente, podendo diferenciar entre a posição à frente ou reversa a sua localização física. A distinção, em corrente alternada, é feita graças ao reconhecimento do ângulo de fase entre a corrente e a grandeza de polarização. Existem, basicamente, dois grupos de relés direcionais: os que respondem ao fluxo de potência normal e os que reagem às condições de falta (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI, 2011).
- c) Relés de Razão: respondem à razão entre duas entradas, dois fasores, onde o relé pode responder à magnitude do número complexo formado pela razão entre esses dois fasores ou ao próprio número complexo. Como exemplo, pode-se citar os relés de impedância e os relés de distância.

- d) Relés Diferenciais: atuam quando a diferença resultante entre os vetores de duas ou mais grandezas elétricas semelhantes ultrapassam um valor pré-determinado. Como exemplo, pode-se citar os relés diferenciais amperimétricos que respondem à soma algébrica das correntes entrando e saindo da zona de proteção.
- e) Relés Pilotos ou com Mídia de Comunicação: utilizam um meio de comunicação para trocar informações entre localizações remotas. Normalmente a decisão tomada pelo relé local (um dos quatro tipos descrito anteriormente) é comunicada ao relé no terminal remoto de uma linha de transmissão, por exemplo.

2.4 Proteção Digital

Com a evolução da tecnologia e o aumento da velocidade de processamento, a aplicação de relés digitais se tornou economicamente viável, chegando ao ponto de, atualmente, os projetos de novas subestações fazerem uso exclusivo da tecnologia de relés de proteção digitais.

Como cada relé digital pode implementar diversas funcionalidades, que antes necessitavam de vários relés eletromecânicos, as funções de proteção (sobrecorrente, direcionalidade, etc.) são agora definidas como ‘elementos de relé’. Assim um único relé digital pode implementar diversas funções usando diversos ‘elementos de relé’, sendo que cada ‘elemento de relé’ será composto por uma ou mais rotina de software.

Além disso, a utilização da proteção digital está possibilitando a implementação da proteção adaptativa, que permite ajustar as funções dos relés automaticamente mediante mudanças nas condições do sistema elétrico. Assim, se torna possível aumentar a confiabilidade em sistemas complexos e bastantes mutáveis dinamicamente. Ademais, as redes de comunicação associadas aos relés digitais contribuem para a melhoria do sistema de proteção.

2.4.1 Benefícios do Uso da Proteção Digital

Pode-se destacar as seguintes vantagens dos relés digitais (PHADKE; THORP, 2009):

- a) Custo: no aparecimento dos relés digitais, seu custo era aproximadamente 10 a 20 vezes o custo dos relés de estado sólido. Porém, atualmente, esse custo foi drasticamente reduzido e a sua velocidade de processamento aumentou substancialmente, de tal forma que as novas subestações podem fazer uso indiscriminado destes equipamentos.
- b) Confiabilidade e Autodiagnose: os relés digitais podem ser programados para constantemente verificar se todas as funções suas, tanto de *hardware* quanto de *software*, estão operativas e corretas. Assim, em caso de defeito, o relé pode se colocar fora de serviço e/ou gerar um aviso no sistema central. Este fato dá ao relé digital extrema confiabilidade, visto que ele sempre estará pronto para operar.

- c) Integração Digital: com o avanço da tecnologia, os microcomputadores têm se tornado base da maioria dos sistemas empregados nas subestações. Como é de se esperar, se torna natural que haja uma integração entre os relés digitais e os sistemas de medição, comunicação de dados, telemetria e controle.
- d) Flexibilidade Funcional: com o emprego de tecnologia digital nos relés, se tornou possível programá-los de tal forma a torná-los multifuncionais. Além da função de proteção, o relé pode ter a função de: medição, monitoramento, controle, localização de faltas, etc.. Juntamente com a característica adaptativa, já citada anteriormente, cria-se diversas outras funções de maneira a tornar o relé mais confiável.
- e) Possibilidade de Implementação de Técnicas Inteligentes: diversas técnicas e ferramentas estão sendo empregadas para melhorar o sistema de proteção graças ao advento dos relés digitais. Dentre elas, pode-se destacar as Redes Neurais Artificiais, Lógica *Fuzzy*, Agentes, Algoritmos Genéticos, dentre outras.

2.4.2 Arquitetura do Relé Digital

A arquitetura dos relés digitais pode ser dividida basicamente em: (i) condicionamento de sinais; (ii) aquisição de dados; (iii) estimação de fasores; (iv) lógica de atuação. Conforme é mostrado na Figura 2.5 (VIANNA, 2013; TAVARES, 2013).

Figura 2.5: Arquitetura do relé digital de sobrecorrente.

- a) Transformadores Auxiliares: transformam as tensões e correntes em tensões adequadas aos microprocessadores (± 10 V), além de realizarem a isolação entre o sistema elétrico e o relé.

- b) Filtro Analógico: é utilizado para evitar erros no processamento digital dos sinais. Desta forma, tem a função de filtrar as componentes de alta frequência e evitar o efeito de sobreposição de espectro (*aliasing effect*).
- c) Grampeador: tem a função de grampear a tensão em ± 10 V, evitando, assim, avarias no circuito interno do relé para o caso de tensões muito elevadas.
- d) *Sampler/Holder*: tem a função de fornecer um sinal adequado para o Conversor A/D. Deste modo, ele coleta o sinal e o mantém constante por um intervalo de tempo definido, minimizando, desta forma, os erros no sinal gerado pelo processo de conversão A/D.
- e) Conversor Analógico/Digital: realiza a transformação do sinal analógico em uma palavra digital de vários bits em intervalos definidos pela taxa amostral.
- f) *Buffer*: é responsável por armazenar os valores a serem utilizados pelo módulo Estimador de Fasor.
- g) Estimador de Fasor: tem a função de determinar o módulo e ângulo das grandezas utilizadas pelo relé.
- h) Lógica de Atuação: este módulo tem a principal função do relé, que é a realização de todos os cálculos necessários para saber se houve uma falta no sistema elétrico e se esta falta pertence a sua zona de proteção, o cálculo do tempo de atuação e o envio do sinal de *trip* para o disjuntor operar, caso seja necessário.

2.4.3 Proteção Adaptativa

O emprego da proteção adaptativa só foi possível graças à crescente utilização de relés digitais no sistema elétrico. Devido ao crescimento do sistema elétrico, os sistemas de potência e distribuição se tornaram mais complexos e bastante dinâmicos. Desta forma, se tornou mais difícil para os relés de proteção, mesmo com a tecnologia digital, a identificação precisa das situações de falta.

Apesar de parecer um conceito novo, o conceito de relé adaptativo já é usado há bastante tempo, pelos relés direcionais, que se adaptam ao sentido da corrente de falta; pelos relés com restrição de harmônica, que se adaptam à energização de transformadores; entre outros (HOROWITZ; PHADKE; THORPE, 1988). Porém, o conceito de proteção adaptativa que é empregado atualmente se baseia na mudança dos parâmetros do sistema de proteção, em resposta às mudanças no sistema elétrico causadas por alterações de cargas, chaveamentos de operação ou mesmo pelas faltas elétricas. Desta forma, a proteção adaptativa permite implementar ajustes em tempo real no sistema de proteção, de maneira a torná-lo mais confiável às condições de variação do sistema elétrico. Isso significa que as características do relé mudam com as alterações do sistema, mantendo-se assim, a eficiência da proteção.

2.5 Relé de Sobrecorrente

Conforme já é sugerido pelo próprio nome, o relé de sobrecorrente tem como grandeza de atuação a corrente do sistema elétrico. Desta maneira, quando a corrente do sistema atinge um valor igual ou superior ao ajuste previamente estabelecido (corrente de *pick-up*), um sinal de *trip* é enviado ao disjuntor para que o mesmo isole a falta. Este relé pode ser classificado em: instantâneo ou temporizado a tempo definido ou tempo inverso.

2.5.1 Sobrecorrente Instantâneo

Os relés de sobrecorrente instantâneos são definidos pelo número 50 segundo o código *American National Standards Institute (ANSI)*. Sua principal função é identificar as faltas mais severas e eliminá-las instantaneamente, visando diminuir os danos causados ao sistema elétrico. Vale ressaltar que, apesar de receber o nome de instantâneo, há um atraso na sua atuação devido ao processamento do relé, o tempo de abertura do disjuntor e o tempo de comunicação entre estes elementos.

No sistema elétrico, o elemento instantâneo normalmente é utilizado junto ao elemento temporizado de tal maneira que sua atuação se dê para correntes superiores a maior corrente de falta no ponto correspondente a 85% da linha, contando a partir do local de instalação do relé. Desta maneira, além de evitar que o relé atue indevidamente na ocorrência de curtos-circuitos próximos a sua linha, porém em outra linha sob a supervisão de outro relé (zona de proteção a jusante), contribui para uma atuação mais rápida para curtos-circuitos próximos ao relé, melhorando, assim, o tempo de atuação sem interferir na coordenação da proteção (SOUZA, 2010). Ademais, sua utilização só é viável em sistemas radiais, onde a coordenação dos relés é feita ajustando a corrente de *pick-up* gradativamente, de maneira que, o relé mais próximo da fonte tenha a maior corrente de *pick-up* e o relé no extremo oposto da linha tenha a menor corrente de *pick-up*. Vale ressaltar que, a coordenação destes relés não se torna apropriada quando a impedância entre os relés não for apreciável, haja vista a dificuldade da distinção da zona de proteção a que pertence a falta.

2.5.2 Sobrecorrente Temporizado

Os relés de sobrecorrente temporizados são definidos pelo número 51 segundo o código *ANSI*. Como dito anteriormente, eles podem ser classificados em tempo definido ou tempo inverso.

- a) Tempo definido: no relé de tempo definido, se faz necessário o ajuste da corrente de *pick-up* e do tempo de atuação. Uma vez que a corrente do sistema elétrico ultrapassa o ajuste da corrente (*pick-up*), inicia-se a contagem do tempo que, quando igual ao tempo de atuação definido, faz com que o relé envie o sinal de *trip* para o disjuntor operar. Vale ressaltar que seu tempo é independente do valor da corrente de falta, ou seja, atua no mesmo tempo

tanto para faltas brandas quanto para faltas severas. Sua coordenação é feita definindo tempos gradativos para os relés de maneira que o maior tempo se encontre no relé mais próximo a fonte e o menor tempo no relé no extremo oposto da linha. Desta forma, esta coordenação se torna inconveniente quanto maior for a quantidade de relés no sistema, pois as faltas próximas a fonte, que possuem um nível de falta (MVA) maior, serão sanadas em um tempo muito elevado (RUSH, 2011).

- b) Tempo inverso: no relé de tempo inverso, o tempo de atuação é inversamente proporcional ao valor da corrente, ou seja, o relé irá atuar em tempos decrescentes para valores de corrente igual ou maior do que a corrente de *pick-up* (Figura 2.6). Para grandes variações da corrente de falta entre os dois extremos do circuito, tempos de disparo mais breves podem ser alcançados pelos relés próximos da fonte onde, como dito, o nível de falta é maior. Desta maneira, as desvantagens da coordenação encontradas nos relés instantâneo e de tempo definido são superadas.

Figura 2.6: Curva característica de tempo inverso.

A seleção das características do relé de sobrecorrente de tempo inverso começam, geralmente, com a seleção certa da curva a ser usada por cada relé, seguida pela calibração da corrente de *pick-up* do relé. Frequentemente adota-se um estilo único de curva para todos os relés. Finalmente são determinados os intervalos de tempo de coordenação e, conseqüentemente, os ajustes do múltiplo de tempo dos relés.

Os estilos de curvas podem seguir padrões europeus (*IEC*), norte-americanos (*ANSI*) ou padrões dos próprios fabricantes. Desta forma, segundo a norma *IEC 60255-3* (*IEC*, 1989),

as curvas de tempo inverso podem ser classificadas como: (i) Inverso Padrão; (ii) Muito Inverso; (iii) Extremamente Inverso; (iv) Inverso Tempo-Curto; (v) Inverso Tempo-Longo. Essas curvas são definidas com base na Equação 2.3 onde t_a é o tempo de atuação do relé, I_r é a razão entre a corrente de curto-circuito e a corrente de *pick-up* (I_{cc}/I_p), MT é o múltiplo de tempo e os valores de k_1 , k_2 e k_3 são dados pela Tabela 2.1.

$$t_a = \frac{k_1 \times MT}{I_r^{k_2} - k_3} \quad (2.3)$$

Tabela 2.1: Curvas existentes da norma IEC 60255-3

Nome da curva	k_1	k_2	k_3
Inverso Padrão	0,14	0,02	1,00
Muito Inverso	13,50	1,00	1,00
Extremamente Inverso	80,00	2,00	1,00
Inverso Tempo-Curto	0,05	0,04	1,00
Inverso Tempo-Longo	120,00	1,00	1,00

A Figura 2.7 mostra o tempo de atuação em função de I_r com MT de 1 segundo para todas as curvas apresentadas na Tabela 2.1.

Figura 2.7: Curva característica de tempo inverso segundo IEC 60255-3.

Já o padrão norte-americano segue a norma IEEE C37.112 (IEEE, 1997). Neste trabalho, serão utilizadas curvas do padrão ANSI com os seguintes tipos: (i) Moderadamente Inverso;

(ii) Inverso; (iii) Muito Inverso; (iv) Extremamente Inverso. A expressão que define essas curvas é descrita na Equação 2.4. Os valores de k_1 , k_2 , k_3 e k_4 são apresentados na Tabela 2.2.

$$t_a = \left(\frac{k_2}{I_r^{k_3} - k_4} + k_1 \right) \times MT \quad (2.4)$$

Tabela 2.2: Constantes da curva de atuação padrão ANSI

Nome da curva	k_1	k_2	k_3	k_4
Moderadamente Inverso	0,0228	0,0103	0,0200	1,0000
Inverso	0,1797	8,9341	2,0938	1,0000
Muito Inverso	0,0982	3,9220	2,0000	1,0000
Extremamente Inverso	0,0243	5,6400	2,0000	1,0000

A Figura 2.8 mostra o tempo de atuação em função de I_r com MT de 1 segundo para as curvas padrão ANSI apresentadas na Tabela 2.2.

Figura 2.8: Curva característica de tempo inverso segundo padrão ANSI.

2.6 Relé Direcional de Sobrecorrente

Os relés direcionais de sobrecorrente (67 conforme código ANSI) são dotados da combinação da unidade direcional e de sobrecorrente. Tal combinação se torna bastante desejada na

proteção de sistemas malhados, pois a unidade de sobrecorrente fica inoperante, independentemente da magnitude da corrente de falta, até que a unidade direcional seja habilitada.

A direcionalidade é obtida por meio da polarização da tensão, cuja área de proteção é definida pela comparação do ângulo de fase entre a corrente e a tensão de polarização. Assim, as tensões de polarização devem permanecer firmes quando ocorre alguma falta, a fim de manter a referência de tensão para a corrente de operação envolvida no defeito. Desta forma, existem três tipos de ligações usuais para a obtenção das tensões de polarização: (i) 90° (quadratura); (ii) 30° (adjacente); (iii) 60° . Conforme é mostrado na Tabela 2.3 (CAMINHA, 1977).

Tabela 2.3: Alimentação dos relés direcionais de sobrecorrente

Tipo de ligação	Tensão de polarização	Corrente de operação
90°	V_{bc}	I_a
	V_{ca}	I_b
	V_{ab}	I_c
30°	V_{ac}	I_a
	V_{ba}	I_b
	V_{cb}	I_c
60°	$V_{bc} + V_{ac}$	I_a
	$V_{ca} + V_{ba}$	I_b
	$V_{ab} + V_{cb}$	I_c

Como pode ser observado na Tabela 2.3, para o caso da ligação em quadratura, quando ocorre um curto-circuito envolvendo a fase A e a terra, a tensão de polarização dessa fase não é prejudicada o bastante a fim de não conseguir distinguir a direcionalidade, pois para o elemento de sobrecorrente da fase A, usa-se as tensões das fases B e C.

Tendo definido o tipo de ligação, o próximo passo é encontrar o ângulo de máximo torque (τ) onde é definido a região de operação e não operação (bloqueio). É importante destacar que o ângulo de máximo torque é sempre tomado em relação à tensão de polarização e que a linha de conjugado nulo fica sempre a $\pm 90^\circ$ da linha de conjugado máximo (C_{max}), conforme mostra a Figura 2.9.

Na Figura 2.9 foi adotada a ligação em quadratura, onde foi possível obter uma tensão de polarização (V_{pol}) através da combinação das tensões das fases B e C. Nota-se que para um curto-circuito na fase A, mesmo que a tensão desta fase (V_{cc}) seja nula, o relé conseguirá operar normalmente devido a tensão de polarização V_{bc} . Desta forma, haverá direcionalidade para qualquer corrente de falta que esteja na parte direita da referência hachurada.

Porém, no instante do curto-circuito trifásico, as tensões das fases podem se tornar nulas. Desta forma, não haveria tensão de polarização o suficiente para diferenciar a direcionalidade, caso o relé não tivesse uma memória de polarização. Desta maneira, os relés contornam esse problema por meio do armazenamento das tensões de pré-falta para reconstruir posteriormente os sinais de tensão. Cabe comentar que a utilização de uma memória de polarização também permite

Figura 2.9: Diagrama vetorial para polarização em quadratura

uma confiável polarização para faltas que causam inversão de tensão (FERRER; SCHWEITZER, 2010).

Já o relé de sobrecorrente direcional de neutro (67N segundo código ANSI) é alocado ao circuito por meio da ligação residual da bobina de corrente, que é inserida no fechamento do neutro dos TCs. A bobina de potencial é conectada ao secundário dos TPs com ligação delta aberto, pois esta ligação filtra a tensão de sequência zero. Nos relés digitais, a tensão de polarização de sequência zero ($3V_0$) é obtida pela soma entre os fasores das tensões de fase, conforme é mostrado na Figura 2.10. Já a corrente de operação de sequência zero ($3I_0$) é obtida pela soma entre os fasores das correntes de fase (RUSH, 2011).

Figura 2.10: Características do relé de sobrecorrente direcional de neutro.

A Figura 2.11 mostra como é obtida a direcionalidade através dos fasores de sequência

zero da tensão de polarização e da corrente de operação. Conforme pode-se observar, é somado 180° ao vetor da corrente de sequência zero. Caso a corrente de sequência zero caia dentro da zona de atuação, que é definida como uma área $\pm 90^\circ$ do conjugado máximo (C_{max}), o relé está apto a atuar, caso contrário a unidade direcional bloqueia a abertura do disjuntor (PANEZ; TAVARES, 2016).

Figura 2.11: Diagrama vetorial para polarização de sequência zero

2.7 Proteção de Linhas de Transmissão

Após apresentados os conceitos sobre os relés de sobrecorrente e sobre a unidade direcional, é necessário levantar alguns aspectos importantes da proteção dos elementos do Sistema Elétrico de Potência (SEP), evidenciando a proteção de linhas de transmissão por relés de sobrecorrente.

Grande parte dos distúrbios ocorridos no SEP estão relacionados às linhas de transmissão, sendo que o maior índice é devido a curtos-circuitos entre fases ou entre fase e terra. Dentre os motivos para o grande número de faltas em linhas de transmissão, pode-se destacar a grande extensão das linhas, o que aumenta as chances de falhas devido a descargas atmosféricas, defeitos de isolamento, entre outras. Em menor proporção, estão as faltas trifásicas, mas que devem ser consideradas no momento da escolha dos equipamentos devido às elevadas correntes de falta e, conseqüentemente, as grandes solicitações térmicas e mecânicas. Geralmente, a proteção de linhas de transmissão é feita com relés de distância, para curtos-circuitos entre fases, e com

relés de sobrecorrente direcional, para curtos-circuitos que envolvam a terra. Vale ressaltar que a proteção de sobrecorrente pode atuar para faltas entre fases, desde que a proteção de distância venha a falhar, porém esta prática não é usual (CAMINHA, 1977).

Sendo o sistema radial e com um único gerador, para uma falta em um determinado ponto, o curto-circuito pode ser extinto apenas com a abertura do disjuntor que está localizado entre o gerador e a falta. Para tanto, pode-se utilizar de relés de sobrecorrente instantâneos ou temporizados. Entretanto, em um sistema com mais de um gerador, com ou sem vários circuitos em paralelo, a solução empregada anteriormente não se torna mais ideal. Assim, em linhas de transmissão em paralelo e com uma única fonte (Figura 2.12) se faz necessário a utilização de pelo menos dois relés de sobrecorrente com o elemento direcional (R2 e R4) (RUSH, 2011). Caso fosse utilizado de relés sem o elemento direcional, para uma falta (F) em uma das linhas de transmissão, a barra B e seus consumidores seriam desconectados, pois ambos os relés, R2 e R4, atuariam ao mesmo tempo, tornando a operação inconveniente. Fazendo uso de relés direcionais e adotando ajustes menores que R1 e R3, consegue-se obter uma operação adequada e discriminante dos relés, pois, na ocorrência de uma falta, somente o circuito defeituoso será retirado.

Figura 2.12: Exemplo da utilização de relés direcionais de sobrecorrente.

A utilização de relés de sobrecorrente para proteção de linhas de transmissão é uma das mais simples e econômicas que existe. Por outro lado, sua aplicação é de difícil concepção e pouco adequada às mudanças topológicas que ocorrem no SEP. Diante disso, os relés de sobrecorrente requerem ajustes periódicos para garantir uma operação ótima. Entre os métodos utilizados para se obter uma correta coordenação estão aqueles baseados na utilização do tempo, da sobrecorrente, ou a combinação de ambos. Entretanto, coordenar os relés somente baseando-se no tempo ou na sobrecorrente gera grandes desvantagens ao sistema de proteção, como, por exemplo, a coordenação por tempo faz com que faltas mais severas sejam eliminadas no mesmo tempo que as menos severas. Assim, se torna de grande interesse a combinação do elemento temporizado com o elemento de sobrecorrente, onde o ajuste destes elementos pode ser feito através de uma escala log/log visando obter uma margem de coordenação satisfatória entre os

relés adjacentes. Este gráfico pode ser obtido de forma manual ou, como é obtido atualmente, empregando programas de computador destinados a esse propósito (RUSH, 2011). Maiores informações a respeito dos relés de sobrecorrente serão dadas na seção 2.5.

2.8 Proteção de Linhas de Distribuição

Feito um levantamento da proteção de linhas de transmissão, também se faz necessário apresentar alguns aspectos importantes da proteção de linhas de distribuição, tendo em vista que serão realizadas simulações nesse sistema.

Diferentemente dos sistemas de transmissão, que apresentam certas dificuldades na coordenação dos relés devido a presença de circuitos em paralelo, os sistemas de distribuição são, de modo geral, radiais. Devido a este fato, há uma facilidade na coordenação dos relés de proteção, tendo em vista uma alta relação entre a corrente de falta e a corrente de carga, na maioria dos casos. Porém, a presença de diferentes dispositivos de proteção e seccionamento, como por exemplo, relés, elos fusíveis, religadores, entre outros, torna a coordenação da proteção não tão elementar, pois, neste caso, busca-se que as faltas temporárias sejam eliminadas pelos religadores e que as faltas permanentes sejam extintas pelo equipamento mais próximo da falta (disjuntor ou elo fusível). Além disso, a energização de grandes motores também pode causar uma operação incorreta do sistema de proteção, caso não sejam levados em conta as suas correntes de partida no momento do projeto de coordenação.

Em grande parte dos casos, as linhas de distribuição são protegidas por relés, religadores e fusíveis com características de coordenação por tempo que respondem às correntes do sistema. Dentre essas características, a aplicação de relé de sobrecorrente com curva Extremamente Inverso se torna ideal, pois, além de ser adequada para coordenação com fusíveis, apresenta resultados satisfatórios para proteção de alimentadores sujeitos a corrente de pico durante o fechamento do circuito (alimentadores com cargas que permanecem conectadas após uma interrupção) (RUSH, 2011).

A utilização de GDs tem tornado mais complexa a coordenação dos equipamentos de proteção. A alteração nos valores da corrente de curto-circuito devido a dependência da quantidade de geradores que se encontram em operação, pode tornar tal processo infactível. Desta maneira, a coordenação entre os equipamentos de proteção em série, como no esquema típico religador-fusível, muito utilizado em linhas de distribuição, pode não ser mais garantida na presença de GDs. Diante disto, a falta desta coordenação pode implicar em desligamentos desnecessários, dificuldade de localização de faltas, aumento no tempo de interrupções e maior custo de manutenção. Ademais, além do fato da inserção de GDs modificar a topologia das redes de distribuição, tornando seus fluxos de potência bidirecionais, há também que se considerar a questão do ilhamento, que nada mais é do que manter parte da rede energizada, porém eletricamente isolada da fonte principal (subestação) (ELÉTRICO, 2017).

Neste caso, quando há a presença de GDs no sistema de distribuição, a utilização de fusíveis na proteção pode não se torna possível caso haja uma demora na retirada ou permanência do GD. Assim, se torna inevitável o uso de relés que, além de possuírem o elemento de sobre-corrente tradicional, devem possuir o elemento direcional. Estes equipamentos instalados em pontos de seccionamento do sistema de distribuição proporcionam uma rápida reconfiguração da rede, bem como melhoram a seletividade do sistema de proteção (FERRER; SCHWEITZER, 2010). Ademais, a utilização de relés digitais pode proporcionar o uso de outras funcionalidades, como por exemplo a medição e monitoramento, que tornariam o sistema de distribuição mais confiável e dinâmico.

2.9 Teleproteção

A teleproteção, além de proporcionar a comunicação e a troca de dados entre os dispositivos de proteção e a subestação, pode permitir a transmissão de comandos entre os equipamentos de proteção localizados na mesma zona ou em zonas remotas. Quando os equipamentos se encontram na mesma zona de proteção, a teleproteção tem como um dos objetivos coordenar a atuação dos relés para que os mesmos venham a atuar em instantes de tempos muito próximos, garantindo, assim, um tempo de abertura similar em ambos os extremos da linha a ser protegida, bem como uma eliminação rápida da falta. Além disso, tal função também pode evitar a atuação indevida de equipamentos de retaguarda, devido ao menor tempo de extinção da falha, e consequentemente permitir que o sistema trabalhe mais próximo do seu limite de estabilidade (CAMINHA, 1977).

Quando utilizada em equipamentos que se encontram em zonas remotas, a teleproteção permite uma operação remota do disjuntor como resultado de um evento local através da transferência de disparo. Tal fato permite uma maior agilidade no tempo de abertura da zona remota e, consequentemente, menores danos aos equipamentos do sistema elétrico. Normalmente a transferência de disparo ocorre por falhas de abertura do disjuntor local, sendo que geralmente se dá de três formas (RUSH, 2011):

- a) Abertura Direta: o sinal de transferência é enviado diretamente ao terminal remoto, sendo que o recebimento do comando resulta na abertura do disjuntor. A utilização deste tipo de transferência deve levar em conta uma comunicação confiável e segura, sem nenhum tipo de interferência, pois qualquer sinal detectado no terminal receptor resulta a atuação do disjuntor.
- b) Abertura Permissiva: a abertura do disjuntor somente ocorre quando o comando recebido coincide com a operação do relé no terminal receptor. Neste caso, não há a necessidade de uma comunicação robusta, tendo em vista que o recebimento de um sinal incorreto deve coincidir com a operação da proteção para que haja uma abertura do circuito.

- c) Esquema de Bloqueio: utilizado para bloquear um elemento de proteção no extremo oposto da linha caso haja uma detecção da falta fora da zona de proteção. O mesmo pode ser feito entre um relé principal e de retaguarda remoto, onde o relé principal bloqueia a atuação do relé de retaguarda para uma falta dentro da zona de proteção do relé principal. Nesta situação, a perda do canal de comunicação não resulta em falhas de abertura, porém aumenta o risco de atuações indesejadas.

Como visto, as mensagens de comunicação envolvidas podem ser muito simples, envolvendo instruções para o dispositivo receptor tomar determinadas ações (cobertura, bloqueio etc.), porém também pode ser mais complexa, como o envio de medidas de um relé a outro (esquema de proteção diferencial). Contudo, como os sinais de comunicação estão sujeitos a ruídos e interferências associados a cada meio de comunicação, deve-se levar em conta a segurança e a dependência no momento do projeto, tendo em vista uma possível perda ou erro no sinal transmitido.

2.10 Considerações Finais

O presente capítulo foi apresentado no sentido de proporcionar ao leitor um entendimento sobre os relés empregados no sistema de proteção, principalmente sobre os relés de sobrecorrente. Para tanto, inicialmente foi feito um resgate a respeito dos conceitos e termos do sistema de proteção. Na sequência, foi feita uma abordagem sobre os relés digitais, mostrando as vantagens de sua utilização, bem como a sua arquitetura. Ainda, uma explicação sobre a proteção de linhas, tanto de transmissão quanto de distribuição, se fez necessária. Também, foram apresentados os conceitos do relé de sobrecorrente, principal escopo deste capítulo, mostrando as características dos elementos instantâneo, temporizado e direcional. Finalmente uma explicação sobre a teleproteção foi realizada, onde foram apresentados os seus benefícios e os cuidados necessários para a sua utilização. Assim, os capítulos posteriores apresentarão a implementação e simulação computacional de tal equipamento e periféricos, bem como o emprego da Lógica *Fuzzy* no relé de sobrecorrente.

3 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL DO RELÉ DE SOBRECORRENTE COM LÓGICA FUZZY

3.1 Considerações Iniciais

De posse dos conhecimentos adquiridos no Capítulo 2 sobre o funcionamento e a estrutura do relé de sobrecorrente, pode-se partir para a implementação deste equipamento. Para tanto, foi utilizado o *software ATP-EMTP* onde, neste capítulo, serão apresentadas as equações empregadas nos relés digitais comerciais, bem como trechos dos códigos utilizados para a sua implementação em tal programa. Além disso, também será exposto e detalhado a aplicação da Lógica *Fuzzy* no relé de sobrecorrente, principal objetivo deste trabalho. Por fim, será tratado o uso da unidade direcional e da teleproteção que são mecanismos que complementam e melhoram o sistema de proteção, mas que não são necessários para o funcionamento do relé de sobrecorrente com Lógica *Fuzzy*.

3.2 Software ATP

A grande complexidade da análise de processos operacionais, bem como de distúrbios ocorridos no sistema de potência, acarretou o desenvolvimento de sofisticados e modernos programas computacionais que possuem uma enorme capacidade de processamento e quantidade de memória. Através dos estudos dos transitórios eletromagnéticos é possível chegar a uma conclusão precisa sobre quais as causas das perturbações, quais medidas a serem tomadas e quais dispositivos são necessários à proteção, de maneira a tornar o sistema de proteção eficaz e confiável.

Neste contexto, surge o *Alternative Transients Program (ATP)*, o qual é derivado do *Electromagnetic Transients Program (EMTP)*. Tal *software* é muito empregado na simulação digital de fenômenos transitórios de natureza eletromagnética em sistemas elétricos. Ele permite a simulação em redes polifásicas, com configurações arbitrárias, através do método de integração trapezoidal, para representação de elementos de parâmetro concentrados e o método das características (método de Bergeron) para a representação de elementos de parâmetro distribuídos (AMON FILHO; PEREIRA, 1994).

3.2.1 ATPDraw

O ATPDraw consiste em um pré-processador gráfico do *ATP* e é usado para criar e editar circuitos. Ele permite ao usuário construir, intuitivamente, circuitos através de símbolos gráficos. O ATPDraw cria o arquivo *ATP* no seu formato correto de forma que “o que você vê é o que você obtém” (HØIDALEN,).

Através dessa interface, o usuário pode construir um sistema elétrico selecionando

modelos pré-definidos de componentes da rede (transformadores, fontes, linhas de transmissão e distribuição, motores, entre outros). A maioria dos componentes padrão do *ATP* estão disponíveis no menu do ATPDraw. Porém, o usuário também possui a possibilidade de criar componentes utilizando *MODELS* e *DATA BASE MODULE* diretamente na interface, aumentando, desta forma, a gama de possibilidade de equipamentos.

3.2.2 Linguagem *MODELS*

MODELS é uma linguagem de descrição de uso geral apoiada por um jogo de ferramentas de simulações para a representação e estudo de sistemas no domínio do tempo. Com ela é possível criar modelos de componentes que não existem na base de modelos do *ATP*, como é o caso dos relés microprocessados. É uma linguagem muito similar à programação em *FORTRAN*, onde seu formato é de texto livre e possui, basicamente, a seguinte estrutura (algoritmo 1).

Algoritmo 1: Exemplo de *MODELS*.

MODEL Exemplo

INPUT

Variáveis de entrada. Podendo ser dados do sistema ou de outra *MODELS*.

OUTPUT

Variáveis de saída. Podem ser usadas no sistema ou em outra *MODELS*.

DATA

Parâmetros de entrada do usuário.

VAR

Declaração de variáveis utilizadas na *MODELS*. Não é declarado variáveis de entrada (*INPUT*), parâmetros de entrada (*DATA*) e constantes (*CONST*).

CONST

Declaração das constantes.

INIT

Ambiente para inicialização das variáveis (*VAR*).

ENDINIT

EXEC

Ambiente para entrada do algoritmo a qual se destina a *MODELS*.

ENDEXEC

ENDMODEL

Um componente criado na *MODELS* pode receber sinais de corrente e/ou tensão do *ATP*, além de permitir manipular os sinais a fim de gerar uma resposta a ser novamente enviada ao sistema, como por exemplo, o sinal de *trip* do relé.

3.3 Lógica *Fuzzy*

O principal foco deste trabalho é a utilização da Lógica *Fuzzy* nos relés de sobrecorrente. A Lógica *Fuzzy* consiste em traduzir expressões verbais, vagas, imprecisas e qualitativas em valores numéricos. Desta forma, se torna possível a inclusão da experiência de operadores humanos em controladores computadorizados, o que agrega grande valor prático a tecnologia (SIMOES; SHAW, 2007).

Na Lógica *Fuzzy*, diferentemente da Lógica Clássica em que os objetos pertencem ou não a uma determinada classe, os objetos podem pertencer mais (ou menos) a uma determinada classe. Por exemplo, se for considerado que o intervalo de 1 a 3 metros define uma distância curta e o intervalo de 3 a 5 metros uma distância média, segundo a Lógica Clássica, uma distância de 2,9999 metros seria classificada como curta, porém na Lógica *Fuzzy* esta distância é classificada como se pertencesse mais a distância média do que a distância curta. Assim, para classificar um objeto é necessário encontrar o grau de pertinência, para uma determinada função de pertinência, de acordo com a Equação 3.1.

$$\mu_A(x) : X \rightarrow [0, 1]; \text{ onde } x \in X \quad (3.1)$$

onde $\mu_A(x)$ retorna o grau de pertinência do elemento x , pertencente ao universo de discurso X , em relação ao conjunto *fuzzy* A .

Na Lógica *Fuzzy*, as principais funções de pertinência utilizadas podem ser classificadas como triangular, trapezoidal e gaussiana. Cabe comentar que estas funções são definidas pela experiência do programador e que, em termos de implementação computacional, as funções são normalmente representadas de maneira discreta (JANTZEN, 2007).

Tendo sido explicado um pouco sobre a Lógica *Fuzzy*, o próximo passo é descrever como é composto o sistema *fuzzy* (Figura 3.1).

Figura 3.1: Diagrama do sistema *fuzzy*.

As regras associadas ao processo de inferência possuem a seguinte forma: Se <condição> então <ação>. Assim, pode-se dizer que Se x é A então y é B . Desta forma, consegue-se construir inúmeras regras, com base na experiência humana, cuja ativação da regra depende do valor de entrada e das variáveis linguísticas escolhidas.

As entradas (valores quantitativos) são apresentadas ao sistema *fuzzy* por meio de medição ou observação de sinais advindos de sensores. Assim, a interface de *fuzzificação* consiste em identificar de quais variáveis linguísticas essas entradas pertencem e seus respectivos graus de pertinência. Também é neste momento que são definidas as regras ativas com base em cada variável linguística ativa. Cabe frisar que variáveis linguísticas são aquelas que permitem a descrição de informações e são normalmente caracterizadas pelos seguintes atributos: nome da variável (distância), conjunto de termo (curta, média e longa), universo de discurso (1 a 7 metros) e funções de pertinência (SIMOES; SHAW, 2007).

Após a *fuzzificação* dos sinais de entrada, realiza-se o procedimento de inferência, onde o resultado deste processo é uma região *fuzzy* de saída, a qual está relacionada com a resposta final do sistema *fuzzy*. Os passos necessários para gerar esta região *fuzzy* de saída são:

- a) Encontrar todas as regras que estejam ativadas;
- b) Determinar a contribuição para a região *fuzzy* de saída advinda de cada uma das regras ativadas;
- c) Combinar todas as contribuições *fuzzy* produzidas a partir de cada regra ativada.

Dado duas entradas (x e y), que representam duas variáveis linguísticas cujo os conjuntos de termos *fuzzy* são representados por $\{A_1, A_2, \dots, A_l\}$ e $\{B_1, B_2, \dots, B_m\}$, respectivamente, é necessário obter a agregação dos graus de pertinência dos termos de entrada associados a cada regra ativa através do conectivo “e” (Equação 3.2). Cabe comentar que além do conectivo “e”, pode-se utilizar o conectivo “ou” que utiliza o operador máximo em vez do operador mínimo.

$$\mu_{AB} = \min\{\mu_A(x), \mu_B(y)\} \quad (3.2)$$

Tendo sido feita a agregação dos graus de pertinência dos termos de entrada, é necessário realizar a implicação destes com suas respectivas saídas. Para tanto, pode-se utilizar dos operadores “Mamdani”, “Zadeh”, “Larsen”, “Aritmético” ou “Booleano” (PATYRA; MLYNEK, 1996). Como exemplo, serão apresentados os operadores “Mamdani” e “Zadeh” através das Equações 3.3 e 3.4, respectivamente.

$$\mu_{C'}(k) = \min\{\mu_{AB}, \mu_C(k)\} \quad (3.3)$$

$$\mu_{C'}(k) = \max\{1 - \mu_{AB}, \min\{\mu_{AB}, \mu_C(k)\}\} \quad (3.4)$$

sendo k o universo de discurso do termo de saída discreto.

Antes de entrar na interface de *defuzzificação*, é feito a agregação das funções de saída da implicação para que seja produzido somente uma única região *fuzzy* de saída que representa a combinação de todas as contribuições de cada regra ativa. Os principais operadores de agregação utilizados no tratamento de problema de engenharia são definidos nas Equações 3.5 e 3.6.

$$\text{Máximo} \rightarrow \mu_T(k) = \max\{\mu_{C'_1}(k), \mu_{C'_2}(k), \dots, \mu_{C'_n}(k)\} \quad (3.5)$$

$$\text{Mínimo} \rightarrow \mu_T(k) = \min\{\mu_{C'_1}(k), \mu_{C'_2}(k), \dots, \mu_{C'_n}(k)\} \quad (3.6)$$

A interface de *defuzzificação* é necessária para se obter sinais pontuais de saída ao invés de uma região fuzzy, pois, normalmente, os atuadores adotam decisões com base em informações precisas (pontuais). Assim, os principais métodos de *defuzzificação* são: “centro de área” (*CDA*), “média dos máximos” (*MDM*) e “primeiro máximo” (*MPM*). As expressões matemáticas que regem estes métodos são apresentadas nas Equações 3.7, 3.8 e 3.9, respectivamente.

$$CDA = \frac{\sum_{k=1}^{N_d} \mu_T(k) \times T(k)}{\sum_{k=1}^{N_d} \mu_T(k)} \quad (3.7)$$

$$MDM = \sum_{k=1}^{Ma} \frac{T(k)}{Ma} \quad (3.8)$$

$$MPM = \min_k \{ \max \{ \mu_T(k) \} \} \quad (3.9)$$

onde N_d é o número de pontos de discretização, $T(k)$ é o valor da variável T para o k -ésimo ponto de discretização e Ma é a quantidade de elementos que contém graus de pertinência máximos.

3.3.1 Lógica Fuzzy aplicada ao Relé de Sobrecorrente

Neste trabalho, a Lógica Fuzzy foi utilizada para ajustar o valor da corrente de *pick-up*, o que torna o relé adaptativo às mudanças do sistema. Desta maneira, o valor da corrente de *pick-up* é determinado pelas variáveis de entrada, corrente de pré-falta e variação da corrente, através da regra de inferência fuzzy do tipo *Se-Então* presente na Tabela 3.1. Tal regra permite aplicar um aspecto relevante na forma de pensar dos seres humanos, a implicação lógica, ou seja, permite formular uma conexão entre a causa e o efeito.

Tabela 3.1: Resumo das regras fuzzy adotadas

E		Corrente de pré-falta				
		Muito baixa	Baixa	Média	Alta	Muito alta
Variação da corrente	Pequena	Corrente de <i>pick-up</i> baixa	Corrente de <i>pick-up</i> média	Corrente de <i>pick-up</i> alta	Corrente de <i>pick-up</i> muito alta	Corrente de <i>pick-up</i> extra alta
	Grande	Corrente de <i>pick-up</i> muito baixa	Corrente de <i>pick-up</i> baixa	Corrente de <i>pick-up</i> média	Corrente de <i>pick-up</i> alta	Corrente de <i>pick-up</i> muito alta

Como pode ser observado na Tabela 3.1, a variável corrente de pré-falta é definida pelos conjuntos de termos: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta. A variável variação

da corrente é definida como sendo pequena ou grande. Já a variável corrente de pick-up é definida pelos termos: muito baixa, baixa, média, alta, muito alta e extra alta. Cabe ressaltar que a atualização da variável corrente de pré-falta é feita a cada ciclo da frequência de 60 Hz (16,6667 milissegundos), já o valor da variável variação da corrente é obtido subtraindo o valor da corrente medida instantaneamente pelo relé do valor da corrente de pré-falta conforme Figura 3.2. Como será mostrado na seção 3.4, a taxa de amostragem adotada foi de 16 amostras por ciclo, o que implica a atualização da corrente medida em uma frequência de 960 Hz (1,0416 milissegundos). Salienta-se que essas correntes correspondem aos valores de saída do Estimador de Fasor e que, portanto, representam valores *rms*.

Figura 3.2: Corrente no secundário do TC, corrente medida, corrente de pré-falta e variação da corrente.

As funções de pertinência das variáveis de entrada foram definidas com base nas Tabelas 3.2 e 3.3. Entretanto, as funções de pertinência da variável de saída foram definidas com base na Tabela 3.4. A localização gráfica dos termos *a*, *b*, *c* e *d* dessas tabelas é mostrada na Figura 3.3. O universo de discurso das funções de pertinência das entradas e saída está entre 0 e 100 A, devido ao fato de que, após este valor, o TC pode começar a saturar (IEEE... , 2016). Vale comentar

Tabela 3.2: Parâmetros da variável corrente de pré-falta do sistema *fuzzy*

Termo linguístico	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
Muito Baixa	0,00	0,00	1,50	2,50
Baixa	1,50	2,50	3,50	4,50
Média	3,50	4,50	5,50	7,00
Alta	5,50	7,00	8,50	10,00
Muito Alta	8,50	10,00	100,00	100,00

que tais valores das tabelas correspondem ao valor *rms* da corrente medida no secundário do TC e foram obtidos empiricamente e refinados ao longo das simulações.

Tabela 3.3: Parâmetros da variável variação da corrente do sistema *fuzzy*

Termo linguístico	a	b	c	d
Pequena	0,00	0,00	1,00	2,00
Grande	1,00	2,00	100,00	100,00

Tabela 3.4: Parâmetros da variável corrente de *pick-up* do sistema *fuzzy*

Termo linguístico	a	b	c	d
Muito Baixa	0,00	0,00	1,50	3,50
Baixa	1,50	3,50	3,50	5,00
Média	3,50	5,00	5,00	6,50
Alta	5,00	6,50	6,50	10,00
Muito Alta	6,50	10,00	10,00	13,50
Extra Alta	10,00	13,50	100,00	100,00

Figura 3.3: Função de pertinência de referência.

Durante a implementação da Lógica *Fuzzy* no programa *ATP-EMTP*, as funções de pertinência foram primeiramente discretizadas em 500 pontos no programa *Matlab* (*The MathWorks, Inc*) para posteriormente serem utilizadas como constantes na implementação da *MODELS*. Tal quantidade de pontos de discretização se torna ideal para representar a curva contínua através de pontos de discretização. O próximo passo, no código da *MODELS*, é determinar os valores das variáveis corrente de pré-falta e variação da corrente para cada fase independentemente (algoritmo 2). Nele, a variável *TEMP* é utilizada para calcular a variação do tempo para obter o valor da corrente de pré-falta (*IRMS*) a cada ciclo da frequência. Já a variável *VARI* é utilizada para calcular a variação da corrente, sendo *IVfund* a corrente de saída do Estimador de Fator

Algoritmo 2: Trecho do código da Lógica *Fuzzy* (Fase A)

```

IF t>=TEMP[1] THEN
  TEMP[1] := t + 0.016666667
  IRMS[1] := IVfund[1]
ENDIF
VARI[1] := abs(IVfund[1] - IRMS[1])

```

atualizada a cada 1,0416 milissegundos. Cabe ressaltar que o número 1 corresponde a posição do vetor que representa a fase A.

Com os valores das variáveis corrente de pré-falta e variação da corrente, são encontrados os respectivos graus de pertinência para cada função de pertinência. Por exemplo, dada uma corrente de pré-falta de 4,00 A, e uma variação da corrente de 5,00 A, com base nas Tabelas 3.2 e 3.3, e Figura 3.3, obtêm-se os graus de pertinência 0,4920 e 0,5080 para as funções corrente de pré-falta baixa e corrente de pré-falta média, respectivamente, e 1 para variação da corrente grande (as demais funções de pertinência não foram ativadas, portanto o grau de pertinência destas funções é zero). No algoritmo 3 é mostrado o trecho correspondente a obtenção dos graus de pertinência de cada função, onde, primeiramente, calcula-se a posição (*j* e *K*) dos valores das variáveis no vetor da corrente, para posteriormente, com essa posição, determinar os graus de pertinência de cada função. NPONTO é a quantidade de pontos utilizados na discretização (500 pontos), *X* é o valor final do universo de discurso (100), PERTI e PERTV são, respectivamente, os graus de pertinência de cada função da corrente de pré-falta e variação da corrente, IMB, IB, IM, IA, IMA, VP e VA são os vetores dos graus de pertinência da corrente de pré-falta muito baixa, baixa, média, alta e muito alta e da variação da corrente pequena e grande, respectivamente.

Algoritmo 3: Trecho do código da Lógica *Fuzzy* (Fase A)

```

j := round((NPONTO - 1) / (X) * (IRMS[1])) + 1
IF j>NPONTO THEN
  j := NPONTO
ENDIF
PERTI[1] := IMB[j]
PERTI[2] := IB[j]
PERTI[3] := IM[j]
PERTI[4] := IA[j]
PERTI[5] := IMA[j]
k := round((NPONTO - 1) / (X) * (VARI[1])) + 1
IF k>NPONTO THEN
  k := NPONTO
ENDIF
PERTV[1] := VP[k]
PERTV[2] := VA[k]

```

Após obtidos os graus de pertinência de cada termo, é utilizado do conectivo “e” (mínimo) para determinar a agregação dos graus de pertinência dos termos de entrada associados a cada regra definida na Tabela 3.1. Para tanto, o operador mínimo calcula o menor valor do grau de

pertinência entre cada termo de entrada da regra (algoritmo 4). Ou seja, dando continuidade ao exemplo anterior, é encontrado o menor grau de pertinência entre corrente de pré-falta baixa e variação de corrente grande, e entre corrente de pré-falta média e variação da corrente grande. Desta forma, teremos os valores 0,4920 e 0,5080 como grau de pertinência dessas duas regras.

Algoritmo 4: Trecho do código da Lógica *Fuzzy* (Fase A)

```

PR1 := min(PERTI[1],PERTV[1])
PR2 := min(PERTI[2],PERTV[1])
PR3 := min(PERTI[3],PERTV[1])
PR4 := min(PERTI[4],PERTV[1])
PR5 := min(PERTI[5],PERTV[1])
PR6 := min(PERTI[1],PERTV[2])
PR7 := min(PERTI[2],PERTV[2])
PR8 := min(PERTI[3],PERTV[2])
PR9 := min(PERTI[4],PERTV[2])
PR10 := min(PERTI[5],PERTV[2])

```

Com as agregações dos graus de pertinência dos termos de entrada, o próximo passo é fazer a implicação destes com as suas respectivas saídas. Assim, utilizou-se do operador “Mamdani” para esta função. Tal operação consiste em calcular o menor valor entre a agregação dos graus de pertinência das entradas da regra e os graus de pertinência do termo de saída associado a esta regra. Por exemplo, corrente de pré-falta baixa e variação da corrente grande ativam, segundo a Tabela 3.1, o termo corrente de *pick-up* baixa. Desta forma, ao realizar a operação de implicação, grampeia-se a função de pertinência de saída em 0,4920, ou seja, a função de saída que antes era triangular se tornou trapezoidal e com o maior valor de pertinência sendo 0,4920. No algoritmo 5 é apresentado o trecho do código referente a implicação, sendo as variáveis PMB, PB, PM, PA, PMA e PEA os vetores dos graus de pertinência da corrente de *pick-up* muito baixa, baixa, média, alta, muito alta e extra alta, respectivamente.

Algoritmo 5: Trecho do código da Lógica *Fuzzy* (Fase A)

```

FOR q:=1 TO NPONTO DO
  PMR1[q] := min(PR1,PB[q])
  PMR2[q] := min(PR2,PM[q])
  PMR3[q] := min(PR3,PA[q])
  PMR4[q] := min(PR4,PMA[q])
  PMR5[q] := min(PR5,PEA[q])
  PMR6[q] := min(PR6,PMB[q])
  PMR7[q] := min(PR7,PB[q])
  PMR8[q] := min(PR8,PM[q])
  PMR9[q] := min(PR9,PA[q])
  PMR10[q] := min(PR10,PMA[q])
ENDFOR

```

Tendo realizado a operação anterior para cada regra, é feita a agregação das novas funções de saída. Para tanto, utilizou-se do operador “máximo” que tem a função de gerar uma única

região *fuzzy* de saída que leva em conta as contribuições de cada regra (algoritmo 6). Continuando o exemplo anterior, é encontrado o maior valor de pertinência entre cada função de saída, para cada ponto de discretização. Desta maneira é gerado a Figura 3.4.

Algoritmo 6: Trecho do código da Lógica *Fuzzy* (Fase A)

```
FOR q:=1 TO NPONTO DO
  AG[q] := max(max(max(max(PMR1[q],PMR2[q]),PMR3[q]),PMR4[q]),PMR5[q])
  AG2[q] := max(max(max(max(PMR6[q],PMR7[q]),PMR8[q]),PMR9[q]),PMR10[q])
  AG3[q] := max(AG[q],AG2[q])
ENDFOR
```

Figura 3.4: Região *fuzzy* de saída agregada.

Após obtida a região *fuzzy* de saída agregada, é feito o processo de *defuzzificação* através do método do “centro de área”. Para o exemplo tratado até o momento, o valor *defuzzificado* é 4,0680, ou seja, este seria o valor da corrente de *pick-up* para uma corrente de pré-falta de 4,00 A e uma variação da corrente de 5,00 A.

No algoritmo 7 é mostrado o trecho do código utilizado na *defuzzificação*, onde P_x é o vetor do valor da corrente de *pick-up* discretizado, $SOAGP_x$ é o somatório da multiplicação do grau de pertinência com a corrente de *pick-up*, $SOAG$ é o somatório do grau de pertinência e

Algoritmo 7: Trecho do código da Lógica *Fuzzy* (Fase A)

```
FOR q:=1 TO NPONTO DO
  AGPx := AG3[q] * Px[q]
  SOAGPx := SOAGPx + AGPx
  SOAG := SOAG + AG3[q]
ENDFOR
PICKUP[1] := SOAGPx / SOAG
```

PICKUP é o valor da corrente de *pick-up* que será utilizado pela unidade de sobrecorrente. A seção A.9 apresenta o código completo utilizado na implementação da Lógica *Fuzzy*.

A Figura 3.5 mostra a atualização da corrente de *pick-up* perante uma variação da corrente do sistema elétrico. Percebe-se que conforme a corrente aumenta, o valor da corrente de *pick-up* também aumenta, sendo que o oposto ocorre quando a corrente diminui. Já no momento que há uma grande variação na corrente do sistema elétrico, podendo caracterizar uma situação de falta, a corrente de *pick-up* tende a diminuir conforme Figura 3.6.

Figura 3.5: Variação da corrente de *pick-up* perante variação da corrente do sistema elétrico.

Figura 3.6: Variação da corrente de *pick-up* perante uma falta no sistema elétrico.

3.4 Modelagem do Relé e Periféricos

Dentre os mais diversos tipos de relés de sobrecorrente, foi escolhido, para ser apresentada a modelagem no ambiente MODELS, o relé de sobrecorrente com Lógica *Fuzzy* temporizado de tempo inverso direcional com teleproteção, tendo em vista que os demais (instantâneo,

tempo definido, não-direcional, sem teleproteção) apresentam modelagem parecida, apenas com acréscimo ou subtração de trechos do código. A modelagem deste equipamento pode ser dividida conforme mostra a Figura 3.7. Vale salientar que o código completo de cada MODELS se encontra no Apêndice A.

Figura 3.7: Estrutura do relé implementado na linguagem MODELS.

3.4.1 Transdutores

Os Transdutores são constituídos pelos TPs e TCs. Os TPs são responsáveis por transformar a tensão do sistema para níveis aceitáveis aos equipamentos (115 V). Já os TCs são responsáveis por reduzir a corrente do sistema para valores próximos a 5 A.

A relação (R_{TP}) entre a tensão medida no primário (V_{pri}) e a tensão entregue no secundário (V_{sec}) do TP é dada pela Equação 3.10. Do mesmo modo, a relação (R_{TC}) da corrente medida no primário (I_{pri}) e a corrente entregue no secundário (I_{sec}) do TC é dada pela Equação 3.11. Deste modo, o algoritmo 8 apresenta o trecho do código implementado no programa *ATP-EMTP*. Vale destacar que não foi levada em conta a não linearidade do núcleo dos Transdutores.

$$R_{TP} = \frac{V_{pri}}{V_{sec}} \quad (3.10)$$

$$R_{TC} = \frac{I_{pri}}{I_{sec}} \quad (3.11)$$

Algoritmo 8: Trecho do código da MODELS Transdutor

```

X_sec[1] := I_pri[1] / R_TC
X_sec[2] := I_pri[2] / R_TC
X_sec[3] := I_pri[3] / R_TC
X_sec[4] := V_pri[1] / R_TP
X_sec[5] := V_pri[2] / R_TP
X_sec[6] := V_pri[3] / R_TP

```

No algoritmo 8, X_{sec} , I_{pri} , V_{pri} , R_{TC} e R_{TP} representam, respectivamente, o sinal de saída no secundário do TC e TP, a corrente de entrada no primário do TC, a tensão de entrada no primário do TP, a relação de transformação do TC e a relação de transformação do TP. Vale salientar que os números de 1 a 6 representam as fases A, B e C da corrente e da tensão.

3.4.2 Transformadores Auxiliares

Os Transformadores Auxiliares têm a função de fornecer no seu secundário, sinais de tensão proporcionais às correntes e tensões que chegam no seu primário, mas com escala reduzida e que varie entre ± 10 V. Seu modelo se baseia na utilização de um transformador com relação 1:1 com um resistor em seu secundário. A tensão de saída do Transformador Auxiliar é obtida pela Equação 3.12 (TAVARES, 2013).

$$V_{saida} = X_{sec} \times R_{sec} \quad (3.12)$$

onde V_{saida} é a tensão entregue para o Filtro Analógico, X_{sec} é a tensão ou corrente medida no secundário do Transdutor e R_{sec} é o valor do resistor no secundário do Transformador Auxiliar.

Para o cálculo de R_{sec} pode-se substituir X_{sec} pela corrente ou tensão do sistema elétrico conforme Equação 3.13.

$$R_{sec} = \frac{Vm_{saida} \times R_X}{X_{pri}} \quad (3.13)$$

onde Vm_{saida} é a tensão máxima de saída (10 V), R_X é a relação de transformação do TP ou TC e X_{pri} é a tensão ou corrente de pico máxima do sistema elétrico no ponto que se encontra o relé. É importante frisar que, para se obter a corrente X_{pri} , é necessário encontrar a máxima corrente de pico de curto-circuito medida pelo relé. Já para encontrar a tensão X_{pri} , pode-se adotar o valor de $1,1 \times \sqrt{2}$ da tensão de fase nominal da linha.

O trecho do código da MODELS responsável por essa função está descrito no algoritmo 9, onde V_{saida} , X_{sec} e R_{sec} são, respectivamente, a tensão de saída (± 10 V), a corrente ou tensão do secundário do TC ou TP e o valor do resistor no secundário do respectivo Transformador Auxiliar.

Algoritmo 9: Trecho do código da MODELS Transformador Auxiliar

```
V_saida[1] := X_sec[1] * R_sec[1]
V_saida[2] := X_sec[2] * R_sec[1]
V_saida[3] := X_sec[3] * R_sec[1]
V_saida[4] := X_sec[4] * R_sec[2]
V_saida[5] := X_sec[5] * R_sec[2]
V_saida[6] := X_sec[6] * R_sec[2]
```

3.4.3 Filtro Analógico

O Filtro Analógico tem a função de filtrar as componentes de alta frequência existentes nos sinais. Ele consiste de um filtro passa-baixa de 3ª ordem do tipo Butterworth, com frequência de corte de 180 Hz (VIANNA, 2013). A Tabela 3.5 mostra as constantes utilizadas pelo filtro, onde a função de transferência é dada pela Equação 3.14. Vale ressaltar que, por se tratar de uma simulação digital, é feita uma filtragem digital equivalente à filtragem analógica, mas para fazer menção ao processo real, utiliza-se o termo filtragem analógica.

Tabela 3.5: Constantes do filtro Butterworth

Parâmetros
$b_0 = 1,6452e9$
$a_0 = 1,6452e9$
$a_1 = 2,7873e6$
$a_2 = 2,3611e3$
$a_3 = 1,0$

$$H(s) = \frac{1,6452 \times 10^9}{s^3 + 2,36113 \times 10^3 s^2 + 2,7873 \times 10^6 s + 1,6452 \times 10^9} \quad (3.14)$$

A implementação desse processo foi feita utilizando-se a função de LAPLACE conforme pode ser visto no algoritmo 10, onde Vf_saida e V_saida representam, respectivamente, o sinal de saída do Filtro Analógico e o sinal de saída do Transformador Auxiliar (sinal de entrada do Filtro Analógico).

Algoritmo 10: Trecho do código da MODELS Filtro Analógico

```
LAPLACE (Vf_saida[1] / V_saida[1]) := b0ls0 / (a0ls0 + a1ls1 + a2ls2 + a3ls3)
LAPLACE (Vf_saida[2] / V_saida[2]) := b0ls0 / (a0ls0 + a1ls1 + a2ls2 + a3ls3)
LAPLACE (Vf_saida[3] / V_saida[3]) := b0ls0 / (a0ls0 + a1ls1 + a2ls2 + a3ls3)
LAPLACE (Vf_saida[4] / V_saida[4]) := b0ls0 / (a0ls0 + a1ls1 + a2ls2 + a3ls3)
LAPLACE (Vf_saida[5] / V_saida[5]) := b0ls0 / (a0ls0 + a1ls1 + a2ls2 + a3ls3)
LAPLACE (Vf_saida[6] / V_saida[6]) := b0ls0 / (a0ls0 + a1ls1 + a2ls2 + a3ls3)
```

3.4.4 Grampeador

O Conversor A/D normalmente possui uma faixa de operação. Caso tensões muito elevadas, que seriam capazes de danificar o circuito interno do relé, cheguem em seus terminais, essas tensões são limitadas aos seus níveis máximos, no caso ± 10 V.

No algoritmo 11 é apresentada a lógica deste módulo para a corrente da fase A. Nele Vf_saida é o sinal recebido do Filtro Analógico e Vg_saida é o sinal de saída do Grampeador.

Algoritmo 11: Trecho do código da MODELS Grampeador (Fase A)

```

IF abs(Vf_saida[1])>10 THEN
  Vg_saida[1] := 10 * sign(Vf_saida[1])
ELSE
  Vg_saida[1] := Vf_saida[1]
ENDIF

```

3.4.5 *Sampler/Holder*

O circuito *Sampler/Holder* tem a função de manter constante um sinal durante um intervalo de tempo. Com isso, o sinal analógico é colocado em formato de escada, aumentando a eficiência do Conversor A/D.

De acordo com o teorema de amostragem de Nyquist, deve-se escolher uma frequência no mínimo duas vezes a frequência fundamental do sistema para a amostragem do sinal. Neste trabalho, optou-se por uma frequência de 960 Hz, valor usualmente encontrado em relés comerciais e que corresponde a uma taxa de 16 amostra/ciclo (ALVARENGA, 2014). Vale esclarecer que os sinais contidos no *ATP-EMTP* já são discretos, porém como as amostras do *ATP-EMTP* são muito elevadas (1 MHz), pode-se considerar o sinal como sendo contínuo. Desta forma, está-se fazendo, na verdade, uma reamostragem do sinal para uma taxa de 16 amostras/ciclo.

Para sua implementação, foi utilizado no ambiente MODELS o comando `TIMESTEP MIN`, de modo que os valores sejam atualizados em período de tempo diferente da simulação.

3.4.6 Conversor Analógico/Digital

O Conversor A/D realiza a transformação do sinal analógico em uma palavra digital de vários bits. Quanto maior for a palavra binária, maior a aproximação do sinal analógico. Seu modelo matemático, apresentado a seguir, pode ser visto em PEREZ (2006).

A modelagem de um Conversor A/D consiste em calcular um número proporcional ao nível de entrada analógica. Neste trabalho foi utilizado do método de Aproximação Sucessiva. Supondo que o Conversor A/D tenha uma palavra de $(b+1)$ bits e o valor de pico da onda seja $\pm Y$, para uma entrada positiva de X^+ volts, o valor digitalizado Z_{10} é definido na Equação 3.15.

$$Z_{10}^+ = INT \left[\frac{X^+ \times (2^b - 1)}{Y} \right] \quad (3.15)$$

onde Z_{10} é o valor digitalizado inteiro na base 10, independentemente da entrada ser ou não inteira, INT é o truncamento da operação, $b + 1$ corresponde a palavra de 16 bits e Y refere-se aos 10 V.

Para um valor de entrada negativa de X^- volts optou-se por utilizar o complemento de dois, porém há a possibilidade de se utilizar o complemento de um ou a representação por sinal e

magnitude. Desta forma, o valor digitalizado Z_{10} é calculado pela Equação 3.16.

$$Z_{10}^- = INT \left[\frac{(2Y - |X^-|) \times 2^b}{Y} \right] \quad (3.16)$$

Define-se a resolução (Res) do Conversor A/D como sendo o valor na base 10, correspondente ao bit menos significativo da palavra de 16 bits (Equação 3.17).

$$Res = \frac{Y}{2^b - 1} \quad (3.17)$$

A partir do valor de Z_{10} , pode-se obter o seu equivalente em ponto flutuante (PF). Assim, para valores de entrada positivos de X , a saída (PF) é dada pela Equação 3.18.

$$PF = Z_{10}^+ \times Res \quad (3.18)$$

E para valores de entrada negativos de X , a saída é dada pela Equação 3.19.

$$PF = (Z_{10}^- - 2^{b+1}) \times Res \quad (3.19)$$

O trecho do código implementado na MODELS para a fase A da corrente é apresentado no algoritmo 12, onde X é o sinal recebido do *Sampler/Holder*, Z_{10} é o valor digitalizado inteiro na base 10, RES é a resolução do conversor, PF é o sinal de saída do conversor, Y é o maior valor da onda de entrada e b é quantidade de bits utilizados pelo Conversor A/D.

Algoritmo 12: Trecho do código da MODELS Conversor Analógico/Digital (Fase A)

```

IF X[1]>=0 THEN
  Z10 := round(X[1] / RES)
  PF[1] := Z10 * RES
ELSE
  Z10 := round(((2 * Y - abs(X[1])) * (2**(b - 1))) / Y)
  PF[1] := (Z10 - 2**b) * RES
ENDIF

```

3.4.7 Buffer

O *Buffer* é responsável por armazenar as amostras das correntes e tensões que serão utilizadas na estimação dos fasores. Ele consiste, basicamente, de um vetor de 17 elementos que armazena os valores recebidos pelo Conversor A/D e a cada passo de atualização o valor antigo é descartado e é acrescentado o novo. O trecho do código da MODELS responsável por essa função é mostrado no algoritmo 13. Nele Vb_saida e PF representam, respectivamente, o sinal de saída do *Buffer* e o sinal de saída do Conversor A/D (sinal de entrada do *Buffer*).

Algoritmo 13: Trecho do código da *MODELS Buffer*

```

FOR i:=2 TO 17 DO
  Vb_saida1[i-1] := Vb_saida1[i]
  Vb_saida2[i-1] := Vb_saida2[i]
  Vb_saida3[i-1] := Vb_saida3[i]
  Vb_saida4[i-1] := Vb_saida4[i]
  Vb_saida5[i-1] := Vb_saida5[i]
  Vb_saida6[i-1] := Vb_saida6[i]
ENDFOR
Vb_saida1[17] := PF[1]
Vb_saida2[17] := PF[2]
Vb_saida3[17] := PF[3]
Vb_saida4[17] := PF[4]
Vb_saida5[17] := PF[5]
Vb_saida6[17] := PF[6]

```

3.4.8 Estimador de Fasor

O algoritmo utilizado para a estimação do fasor da componente fundamental foi o Filtro Cosseno Modificado. Hart, Novosel e Smith (2000) mostraram que, a partir de duas saídas consecutivas do filtro cosseno de um ciclo de Fourier, aplicando um fator de correção de modo a manter a ortogonalidade entre a parte real e imaginária do fasor, era possível obter melhor eliminação da componente DC de decaimento exponencial. Isso também é comprovado em Lopes et al. (2015), Oliveira e Souza (2012).

Sua formulação é baseada nas seguintes Equações 3.20 e 3.21 que representam, respectivamente, a parte real e imaginária do fasor estimado.

$$\dot{F}_{re} = C_1 \quad (3.20)$$

$$\dot{F}_{im} = \frac{C_1 \times \cos(\delta) - C_2}{\sin(\delta)} \quad (3.21)$$

onde C_1 é dado pela Equação 3.22 e C_2 é dado pela Equação 3.23.

$$C_1 = \frac{2}{N} \times \sum_{k=1}^N \chi_k \times \cos[(k-1) \times \delta] \quad (3.22)$$

$$C_2 = \frac{2}{N} \times \sum_{k=1}^N \chi_{(k+1)} \times \cos[(k-1) \times \delta] \quad (3.23)$$

sendo N o número de amostras por ciclo, χ_k o valor da amostra para a k -ésima posição do vetor do módulo *Buffer* e δ a defasagem angular entre as amostras, dada por $\delta = \frac{2\pi}{N}$.

O trecho do código no qual se realiza a estimação do fasor da corrente da fase A é apresentado no algoritmo 14. Como se deseja obter o valor *rms* da corrente e tensão medida na linha, as Equações 3.22 e 3.23 são divididas por $\sqrt{2}$ e, posteriormente, multiplicadas por RTEF, que corresponde ao inverso do valor do resistor no secundário do Transformador Auxiliar (Equação 3.13).

Algoritmo 14: Trecho do código da MODELS Estimador de Fasor (Fase A)

```

FOR k:=1 TO N DO
  C1 := C1 + (sqrt(2) / N) * Vb_saida1[k] * cos((k - 1) * delta)
  C2 := C2 + (sqrt(2) / N) * Vb_saida1[k+1] * cos((k - 1) * delta)
ENDFOR
Ire1 := RTEF * C1
Iim1 := RTEF * (C1 * cos(delta) - C2) / sin(delta)
IVfund[1] := norm(Ire1,Iim1)
IF Ire1=0 THEN
  IVfund[2] := 0
ELSE
  IVfund[2] := deg(atan2(Iim1,Ire1) + delta)
ENDIF

```

No algoritmo 14, *N* é a quantidade de amostras por ciclo, *Vb_saida1* é o sinal de entrada do estimador, *delta* é a defasagem angular entre as amostras, *Ire1* e *Iim1* são, respectivamente, a parte real e imaginária do vetor, *IVfund[1]* é o módulo do vetor e *IVfund[2]* é o ângulo do vetor.

3.4.9 Lógica de Atuação / Direcionalidade / *Trip* / Teleproteção

Os módulos da Lógica *Fuzzy*, da unidade de sobrecorrente, da unidade direcional e da teleproteção se comunicam conforme a Figura 3.8.

3.4.9.1 Lógica de Atuação

Como dito na subseção 3.3.1, a Lógica *Fuzzy* obtém os valores das variáveis variação da corrente e corrente de pré-falta por meio da corrente de saída do Estimador de Fasor e, através dos processos de *fuzzificação* e *defuzzificação*, determina o valor da corrente de *pick-up* para determinado instante de medição da corrente do sistema elétrico. Esta saída, corrente de *pick-up*, é inserida na unidade de sobrecorrente. Esta, por sua vez, tem a função de verificar se a corrente do sistema elétrico ultrapassou a corrente de *pick-up* obtida ($I \geq I_p$) e, caso tenha ocorrido, começa-se a contagem do tempo de atuação de acordo com a Equação 2.3 ou 2.4 e a curva selecionada. Quando atingido a condição de operação dada pela Equação 3.24 (CORRÊA, 2012), um sinal é enviado para o módulo de *trip*.

$$\Delta t_{amos} \times \sum_{k=1}^{k_{op}} \frac{1}{t_a} = 1 \quad (3.24)$$

Figura 3.8: Arquitetura da lógica de atuação, direcionalidade e teleproteção.

onde Δt_{amos} é o intervalo de amostragem e k_{op} é a quantidade de amostras processadas até que o relé opere.

No algoritmo 15 é mostrado o trecho do código da unidade de sobrecorrente para a fase A, onde PICKUP é o valor da corrente de *pick-up* definido pela Lógica Fuzzy, AUXI e AUXI2 são variáveis auxiliares utilizadas na implementação, I_r é a razão entre a corrente de curto-circuito e a corrente de *pick-up*, t_a é o tempo de atuação do relé, K1, K2 e K3 são as constantes da curva (dados de entrada), MT é o múltiplo de tempo (dado de entrada), TEM é responsável por receber o resultado da multiplicação entre o intervalo de amostragem (timestep) e o inverso do tempo de atuação, TE representa o somatório para determinar a condição de operação e ACIONAR corresponde o sinal enviado para o módulo de *trip*.

Algoritmo 15: Trecho do código da unidade de sobrecorrente (Fase A)

```

IF IVfund[1]>=PICKUP[1] THEN
    AUXI[1] := 1
    AUXI2[1] := 1
ENDIF
IF AUXI[1]=1 THEN
    I_r := IVfund[1] / PICKUP[1]
    t_a := ((K1 * MT) / (I_r**K2 - K3))
    TEM := timestep * (1 / t_a)
    TE[1] := TE[1] + TEM
    IF TE[1]>=1 THEN
        ACIONAR := 1
    ENDIF
ENDIF

```

3.4.9.2 Direcionalidade

A unidade direcional necessita, além das medidas das correntes, das medidas de tensões para determinar as regiões de operação e bloqueio, como visto na seção 2.6. Visando evitar erros na obtenção da direcionalidade, os sinais de tensões passam por um filtro de memória de tensão proposto por Silva e Almeida (2016), cujo equacionamento para o cálculo da tensão de saída é dado pela Equação 3.25.

$$\dot{V}_m(k) = \alpha \times \dot{V}(k) + (1 - \alpha) \times \dot{V}_m(k - 1) \quad (3.25)$$

sendo $\dot{V}_m$ o vetor da tensão de saída do filtro, α o fator de esquecimento dado pela Equação 3.26 e $\dot{V}$ o vetor da tensão de saída do Estimador de Fator.

$$\alpha = \frac{1}{M_d \times N + 1} \quad (3.26)$$

M_d e N são a constante de decaimento em número de ciclo e a quantidade de amostra por ciclo, respectivamente.

Como visto até aqui, neste trabalho tem-se adotado 16 amostras por ciclo. Assim, para alterar o fator de esquecimento foi definido que, para valores menores que 55 V (0,83 p.u. da tensão de fase), M_d seja igualado a 100, e para valores de tensões maiores, que representa o sistema sem defeito, M_d seja igualado a 5. Além disso, durante a inicialização do relé, foi adotado $M_d=0,1$ a fim de carregar a memória de tensão. O trecho do código que modela o filtro de memória de tensão é apresentado no algoritmo 16 sendo $IVfund[7]$ e $Vang[1]$, respectivamente, o módulo e ângulo da tensão da fase A, M a constante de decaimento, α o fator de esquecimento, N a quantidade de amostra/ciclo, $VMmod$ e $VMang$ o módulo e ângulo de saída do filtro de memória de tensão.

Algoritmo 16: Trecho do código do filtro de memória de tensão (Fase A)

```

IF t>0.2 THEN
  M[1..3] := 5
  IF IVfund[7]<=55 THEN
    M[1] := 100
  ENDIF
ELSE
  M[1..3] := 0.1
ENDIF
alfa[1] := 1 / (M[1] * N + 1)
VMmod[1] := alfa[1] * IVfund[7] + (1 - alfa[1]) * VMmod[1]
VMang[1] := alfa[1] * Vang[1] + (1 - alfa[1]) * VMang[1]

```

A Figura 3.9 mostra a tensão do sistema e a tensão de saída do filtro de memória para uma oscilação na tensão do sistema elétrico. Percebe-se que quando a tensão ficou abaixo de 55

V houve uma atualização da constante de decaimento para o valor 100, e quando a tensão voltou para o patamar acima de 55 V, M_d voltou para o valor 5.

Figura 3.9: Tensão do sistema elétrico e tensão de saída do filtro de memória de tensão.

Após obtido o vetor de tensão de saída do filtro, é necessário calcular as tensões de polarização que dependem do tipo de ligação utilizada (30° , 60° ou 90°). Vale frisar que, como estamos trabalhando com relés digitais, essa defasagem é obtida por meio de programação e não por meio de conexões do relé.

Assim, o algoritmo 17 apresenta o trecho do código responsável pelos cálculos da tensão de polarização da corrente da fase A, sendo que o tipo de conexão é dado por uma variável de entrada CONEX. *imag* e *rea* representam, respectivamente, a parte imaginária e real dos vetores de tensão de saída do filtro.

Algoritmo 17: Trecho do código da unidade direcional (Fase A)

```

IF CONEX=90 THEN
    Vagpo[1] := deg(atan2((imag[2] - imag[3]),(rea[2] - rea[3])))
ENDIF
IF CONEX=60 THEN
    Vagpo[1] := deg(atan2((imag[2] - imag[3] + imag[1] - imag[3]),(rea[2] - rea[3] + rea[1] -
    rea[3])))
ENDIF
IF CONEX=30 THEN
    Vagpo[1] := deg(atan2((imag[1] - imag[3]),(rea[1] - rea[3])))
ENDIF

```

Tendo sido calculado os ângulos das tensões de polarização, o próximo passo é somar o ângulo de máximo torque (dado de entrada) aos ângulos de polarização para determinar o ângulo de conjugado máximo. Para definir se a falta está dentro da zona de atuação ou não, é realizado uma subtração entre o ângulo de conjugado máximo e o ângulo da corrente, de tal forma que, se o resultado estiver entre ± 90 , significa que a falta está dentro da zona do relé.

O trecho do código responsável por verificar se a falta está dentro da zona de atuação é mostrado no algoritmo 18. CO_{max} é o ângulo de conjugado máximo, $ANGCON$ é o ângulo de máximo torque, $ANGat$ é utilizado para determinar a localização da falta, I_{ang} é o ângulo da corrente e $ATUA$ é o sinal enviado ao módulo de *trip*.

Algoritmo 18: Trecho do código da unidade direcional

```

FOR x:=1 TO 3 DO
  COmax[x] := Vagpo[x] + ANGCON
  ANGat[x] := COmax[x] - Iang[x]
  IF ANGat[x]<90 and ANGat[x]>-90 and AUXI[x]=1 THEN
    ATUA[x] := 1
  ELSE
    ATUA[x] := 0
  ENDIF
ENDIF
ENDFOR

```

3.4.9.3 Trip

O módulo de *trip* recebe os sinais de atuação da unidade de sobrecorrente e da unidade direcional. Caso essas duas unidades estejam liberando a abertura do sistema elétrico, um sinal é enviado para o disjuntor. Na implementação (algoritmo 19), além de ser verificado os sinais recebido pela unidade de sobrecorrente e direcional, é feito uma checagem se a corrente do sistema é maior que a corrente de *pick-up*, de forma a evitar erros de abertura. Também, para que ocorra o envio do sinal de abertura ao disjuntor, o relé não deve estar recebendo nenhum sinal de bloqueio da teleproteção ($ENTRA2=0$).

Algoritmo 19: Trecho do código do módulo de *trip*

```

IF (ACIONAR=1 and (IVfund[1]>=PICKUP[1] or IVfund[3]>=PICKUP[2] or
  IVfund[5]>=PICKUP[3]) and (ATUA[1]=1 or ATUA[2]=1 or ATUA[3]=1) and ENTRADA2=0)
  THEN
    TRIP := 1
  ENDIF

```

O módulo de *trip* também pode enviar um sinal de abertura para o disjuntor caso receba sinais da teleproteção (algoritmo 20). Os sinais recebidos da teleproteção poderão permitir tanto uma abertura permissiva quanto realizar um bloqueio do relé de retaguarda remoto. Mais detalhe a respeito da teleproteção será dado a seguir.

Algoritmo 20: Trecho do código do módulo de *trip*

```

IF (ENTRADA1=1 or ENTRADA2=1) and (IVfund[1]>=PICKUP[1] or IVfund[3]>=PICKUP[2]
  or IVfund[5]>=PICKUP[3]) THEN
  TRIP := 1
ENDIF

```

3.4.9.4 Teleproteção

A implementação da teleproteção segue a lógica apresentada na Figura 3.10. Quando um sinal de abertura é enviado para o disjuntor, no mesmo instante é enviado um sinal positivo para a *saída1*. Este sinal chega ao relé no extremo oposto da linha de transmissão e é representado pela *entrada1*. Como visto no algoritmo 20, caso a *entrada1* seja positiva e a corrente do sistema seja maior que a corrente de *pick-up*, um sinal é enviado ao disjuntor, para que o mesmo realize a abertura do sistema. Este esquema de abertura permissiva permite que ambos os extremos da linha sejam abertos quase ao mesmo tempo.

Figura 3.10: Lógica aplicada na teleproteção. *Rec.* e *Transm.* são blocos receptores e transmissores, respectivamente.

Além disso, no instante em que é enviado um sinal para a *saída1*, também é enviado um sinal negativo para a *saída2*. Este, por sua vez, chega ao relé de retaguarda remoto e é representado pela *entrada2*. Como visto nos algoritmos 19 e 20, o relé só envia o sinal de abertura para o disjuntor caso a *entrada2* seja zero ou positiva. Desta forma, é criado um esquema de bloqueio que impede que o relé de retaguarda atue indevidamente. Porém, caso haja uma falha na abertura do disjuntor do relé primário, após atingir o tempo do *ITC*, um sinal positivo é enviado para o relé secundário de forma que o disjuntor deste relé abra o sistema. Como as entradas (*entrada1* e *entrada2*) dos relés são configuradas para serem zero e só mudarem seu estado quando houver um sinal externo, isso não impede que o relé secundário venha a atuar caso tenha uma falha de comunicação e o relé primário falhe. Cabe ressaltar que neste trabalho não foi levado em conta nenhum atraso de comunicação.

O trecho do código responsável pela lógica de teleproteção é apresentado no algoritmo 21.

3.4.10 Período Zero da Corrente

Visando deixar a simulação o mais próximo da realidade, foi implementado esta **MODELS**, cuja a função é realizar a abertura dos polos do disjuntor no instante em que a corrente do sistema elétrico passa por zero. Este processo, comum em disjuntores de alta tensão, evita

Algoritmo 21: Trecho do código do módulo de *trip*

```

IF TRIP=1 THEN
  SAIDA1 := 1
  SAIDA2 := -1
  cont := cont + timestep
  IF cont>=ITC THEN
    IF (IVfund[1]>=PICKUP[1] or IVfund[3]>=PICKUP[2] or IVfund[5]>=PICKUP[3]) THEN
      SAIDA2 := 1
    ELSE
      SAIDA2 := 0
    ENDIF
  ENDIF
ELSE
  SAIDA1 := 0
  SAIDA2 := 0
ENDIF

```

o aparecimento de transitórios ocasionados pela abertura do sistema elétrico, bem como pode evitar o aparecimento de arco voltaico dentro do disjuntor. O trecho do código responsável por esta função é apresentado no algoritmo 22. Cabe ressaltar que as chaves de abertura utilizadas no disjuntor do *ATP* possuem lógica inversa, ou seja, ao receber sinal 0 elas abrem e ao receber sinal 1 elas fecham.

Algoritmo 22: Trecho do código da MODELS Período Zero da Corrente

```

auxsigI[1] := SIGN(I[1])
auxsigI[2] := SIGN(I[2])
auxsigI[3] := SIGN(I[3])
IF TRIP=1 THEN
  IF cont=0 THEN
    cont := cont + 1
    sigI[1] := SIGN(I[1])
    sigI[2] := SIGN(I[2])
    sigI[3] := SIGN(I[3])
  ENDIF
  IF sigI[1]<>auxsigI[1] THEN
    TRIPA := 0
  ENDIF
  IF sigI[2]<>auxsigI[2] THEN
    TRIPB := 0
  ENDIF
  IF sigI[3]<>auxsigI[3] THEN
    TRIPC := 0
  ENDIF
ENDIF

```

3.5 Considerações Finais

Neste capítulo foi explicado como será empregada a Lógica *Fuzzy* no relé de sobrecorrente, mostrando como é obtida a corrente de *pick-up* através das entradas corrente de pré-falta e variação da corrente. Também foi mostrado como o sistema *fuzzy* irá se comportar perante variações de carga do sistema elétrico, bem como perante a uma situação de falta. Ademais, foi apresentado como foi realizada a modelagem de cada componente e periférico do relé, tanto computacionalmente quanto através de equações matemáticas. Por fim, foi mostrada a lógica envolvida na direcionalidade e na teleproteção que, apesar de não serem necessárias para o funcionamento do relé de sobrecorrente, se torna essencial em algumas situações em que o relé será empregado. Assim, no capítulo posterior será exposto a utilização do relé de sobrecorrente com Lógica *Fuzzy* nos sistemas elétricos em estudo.

4 ESTUDOS DE CASOS

4.1 Considerações Iniciais

Este capítulo é voltado para os estudos relacionados ao desempenho do relé de sobre-corrente, utilizando a Lógica *Fuzzy* para alterar o valor da corrente de *pick-up*, no sentido de verificar sua sensibilidade e os ganhos obtidos com sua utilização. Para tanto, serão feitas simulações computacionais em alguns sistemas elétricos, de modo a demonstrar o funcionamento do equipamento.

4.2 Especificações e Simulações dos Sistemas

Os casos simulados nesta seção utilizaram o sistema teste de distribuição de 4 barras (Estudo 1) e de 13 barras (Estudo 2) e o sistema de transmissão de 14 barras (Estudo 3), todos do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE). Para estas simulações foram utilizados os relés de sobrecorrente instantâneos e temporizados com a Lógica *Fuzzy* alterando o valor da corrente de *pick-up*, sendo que para o sistema de transmissão de 14 barras também foi utilizada a unidade direcional e a teleproteção.

4.2.1 Estudo 1

O Estudo 1 faz uso de um sistema simples, pois a proposta desta análise preliminar é verificar o funcionamento do sistema *fuzzy* quando há alteração de carga, bem como verificar o ganho em relação ao tempo de atuação do relé com e sem a Lógica *Fuzzy* alterando o valor da corrente de *pick-up*. Para tanto, foi utilizado o sistema teste mostrado na Figura 4.1. A conexão do transformador, de potência nominal de 2.000 kVA, é delta do lado de alta tensão (7,2 kV fase-neutro) e estrela aterrado do lado de baixa tensão (2,4 kV fase-neutro). Demais informações sobre o sistema podem ser vistas em IEEE (2013).

Figura 4.1: Sistema teste utilizado no Estudo 1.

Como se pode observar na Figura 4.1, foram utilizados dois relés de sobrecorrente com Lógica *Fuzzy* temporizados de tempo inverso, os quais foram alocados entre as barras 1-2 e 3-4, próximos a barra 1 (Relé 1) e a barra 3 (Relé 2). Em ambos os Relés foram inseridos os valores dos parâmetros referentes ao estilo de curva *IEC* Inverso Padrão (Tabela 2.1), com valores de

múltiplo de tempo igual a 0,10 e 0,05 para o Relé 1 e 2, respectivamente. Vale frisar que não foi verificado o intervalo de tempo de coordenação, sendo esses valores ajustados somente para se obter a seletividade de coordenação.

As relações de transformação dos TCs foram ajustadas em 10 e 30 para os Relés 1 e 2, respectivamente. Já as cargas foram alteradas durante os testes, onde no primeiro caso foi utilizada uma carga em delta com valor de resistência de 36,7996 ohms e reatância indutiva de 15,6767 ohms por fase, obtendo, desta forma, os valores de correntes, no secundário dos TCs, descritos na Figura 4.2.

Figura 4.2: Correntes da fase A no secundário dos TCs dos Relés 1 e 2 - sistema sem defeito.

Um curto-circuito trifásico foi aplicado na barra 4 quando a simulação atingiu 0,5 s. Com isso, foi possível coletar os valores das correntes de *pick-up* disponibilizados pelo sistema *fuzzy*, bem como o tempo de atuação do Relé 2 (Figura 4.3). Vale ressaltar que, como o tempo de atuação do Relé 2 é menor que o tempo de atuação do Relé 1, este não teve seu *trip* ativado devido à extinção da corrente de falta pelo Relé 2.

De acordo com a Figura 4.3, os valores das correntes de *pick-up* dos Relés 1 e 2 no momento anterior a falta eram 8,17 A, já no momento da falta estes valores foram reduzidos para 5,96 A em ambos os relés. Deste modo, foi possível obter um tempo de atuação de 0,1064 s para o Relé 2.

Para realizar uma comparação do tempo de atuação, foi retirado o módulo *fuzzy* onde, em seu lugar, foi inserida uma constante de modo a fixar o valor da corrente de *pick-up*. Para tanto, foram inseridos os valores das correntes de *pick-up* fornecidos pelo sistema *fuzzy* no momento anterior a falta. Assim, a Figura 4.4 mostra as correntes de *pick-up* dos Relés 1 e 2 bem como os sinais de *trip* de ambos os Relés.

Como pode ser observado na Figura 4.4, os valores das correntes de *pick-up* permaneceram os mesmos durante o curto-circuito. Desta maneira, um tempo de atuação de 0,1179 s foi obtido para o Relé 2, o que corresponde a uma diferença de 0,69 ciclos de 60 Hz em relação à simulação da Figura 4.3. Porém, como se sabe, dificilmente a carga do sistema permanece

Figura 4.3: Correntes da fase A no secundário dos TCs, correntes de *pick-up* e sinais de *trip* dos Relés 1 e 2 com o sistema *fuzzy*.

Figura 4.4: Correntes de *pick-up* e sinais de *trip* dos Relés 1 e 2 sem o sistema *fuzzy*.

inalterada. Além do mais, ao utilizar tais valores das correntes de *pick-up*, limita-se a corrente drenada pela carga no secundário do transformador de distribuição em 245 A. Portanto, caso a carga necessite de uma potência maior, seria necessário aumentar os valores das correntes de *pick-up* destes Relés. Tal aumento implicaria em um tempo maior de eliminação da falta, conforme pode ser deduzido pela Equação 2.3.

Agora, considerando-se que a maior carga que pode ser inserida no sistema drena uma

corrente de 275 A (potência nominal do transformador de distribuição), se torna necessário definir novos valores para a corrente de *pick-up*. Desta maneira, os relés sem o sistema *fuzzy* tiveram a corrente de *pick-up* ajustados em 10 A em ambos os Relés 1 e 2, o que corresponde a uma corrente no primário do TC de 100 A e 300 A (aproximadamente 10% maior que a máxima corrente de carga). Assim, a Figura 4.5, mostra o comportamento do relé com esses novos valores de corrente de *pick-up* para o caso estudado até o momento.

Figura 4.5: Correntes de *pick-up* e sinais de *trip* dos Relés 1 e 2 com *pick-up* em 10 A (Relé 1 e 2).

É possível obter, para esses novos valores da corrente de *pick-up*, um tempo de atuação de 0,1262 s para o Relé 2, o que corresponde a uma diferença de 1,19 ciclos de 60 Hz em relação a simulação com o sistema *fuzzy* (Figura 4.3). Diante disso, sabe-se que, ao adotar os valores da corrente de *pick-up* em 10 A para os Relés 1 e 2, independentemente do valor da corrente de carga, para um curto-circuito trifásico na barra 4, o tempo de atuação do Relé 2 sempre será 0,1262 s.

Como no sistema *fuzzy* o valor da corrente de *pick-up* se altera conforme a corrente de carga, é possível obter vários tempos de atuação para o Relé 2 variando-se a carga do sistema. Desta maneira, serão mostrados a seguir dois casos, onde o primeiro consiste em uma carga drenando 80 A e o segundo 250 A.

Para uma carga em delta, com resistência de 82,7999 ohms e reatância indutiva de 35,2726 ohms por fase, drenando uma corrente de aproximadamente 80 A, obtém-se segundo a Figura 4.6, um valor da corrente de *pick-up* antes da falta de 5,00 A e durante a falta, um valor de 3,33 A para ambos os Relés. Neste caso, o tempo de atuação obtido para o Relé 2 é de 0,0908 s, o que corresponde a uma diferença de 2,12 ciclos de 60 Hz, se comparado com o tempo obtido com o relé sem o sistema *fuzzy* e com as correntes de *pick-up* atualizadas (0,1262 s).

Já para uma carga em delta, com resistência de 26,4959 ohms e reatância indutiva de 11,2872 ohms por fase, drenando uma corrente de aproximadamente 250 A, foi obtido, conforme

Figura 4.6: Correntes de *pick-up* e sinais de *trip* dos Relés 1 e 2 - corrente de carga de 80 A.

Figura 4.7, um valor da corrente de *pick-up* de 10,00 A antes da falta, para ambos os Relés, e de 7,17 A e 9,23 A durante a falta para os Relés 1 e 2, respectivamente. Desta maneira, o tempo de atuação encontrado para o Relé 2 foi de 0,1127 s, o que corresponde a uma diferença de 0,81 ciclos de 60 Hz em relação ao tempo de atuação do relé sem o sistema *fuzzy* e com as correntes de *pick-up* atualizadas.

Figura 4.7: Correntes de *pick-up* e sinais de *trip* dos Relés 1 e 2 - corrente de carga de 250 A.

Através dos resultados obtidos até o momento, pode-se perceber que a diferença do tempo de atuação se torna mais expressivo nos casos em que a corrente de carga é muito menor que a máxima corrente de carregamento (275 A) e que nos casos em que as correntes são próximas, o tempo de atuação do relé com módulo *fuzzy* se torna próximo do tempo de atuação do relé convencional. Esse comportamento é dado devido as características do sistema *fuzzy* implementado que, conforme a carga, gera um determinado valor da corrente de *pick-up*. Além disso, no caso das Figuras 4.5 e 4.7, que apresentam os mesmos valores da corrente de *pick-up* para o Relé 2 no momento anterior a falta, há uma diferença nos tempos de atuação devido a

atualização da corrente de *pick-up*, pelo sistema *fuzzy*, no momento que a falta ocorre.

4.2.2 Estudo 2

O Estudo 2 tem como objetivo mostrar o comportamento do relé proposto em sistemas com GDs. Desta maneira, será aplicada diversas falta, com diferentes resistências de falta, em inúmeras condições de geração. Ademais, também será mostrada as vantagens de se utilizar a magnitude de tensão no cálculo do tempo de atuação. Para tanto, foi utilizado o sistema teste mostrado na Figura 4.8 onde as cargas originais foram substituídas por cargas com impedância constante, conforme apresentado na Tabela 4.1, totalizando uma potência de 2,71 MVA. Neste sistema, foram desconsiderados os bancos de capacitores e o regulador de tensão a fim de simplificá-lo. A conexão do transformador da subestação, de potência nominal de 5 MVA, é delta do lado de alta tensão (115 kV fase-fase) e estrela aterrado do lado de baixa tensão (4,16 kV fase-fase). Demais informações podem ser vistas em IEEE (2013).

Figura 4.8: Sistema teste utilizado no Estudo 2.

Tabela 4.1: Dados da carga - Estudo 2

Nó	Modelo	Resistência (Ω)	Indutância (mH)
611	Monofásica (Fase C)	31,0501	55,3377
632	Estrela Aterrada	252,0953	393,3550
634	Estrela Aterrada	0,4096	0,8149
645	Monofásica (Fase B)	122,0247	42,9576
646	Monofásica (Fase C)	156,5993	86,1640
652	Monofásica (Fase A)	112,0247	32,9576
671	Delta	33,8851	51,3617
675	Estrela Aterrada	47,6970	111,6355
692	Delta	56,9032	134,0706

No sistema foi inserido um aerogerador no nó 680, onde o modelo do aerogerador utilizado foi obtido por meio de Bonelli (2010). Em tal referência é feito um estudo de um aerogerador síncrono de imã permanente com um conversor de frequência para a conexão no Ponto de Acoplamento Comum (PAC).

Nesta simulação foi utilizado do relé de sobrecorrente com Lógica *Fuzzy* temporizado de tempo inverso nos nós 650-632, 632-633, 632-645, 632-671, 671-692 e 671-684, próximos aos nós 650 (Relé 1), 632 (Relé 2), 632 (Relé 3), 632 (Relé 4), 671 (Relé 5) e 671 (Relé 6), respectivamente. Além disso, também foi utilizado um relé de sobrecorrente com Lógica *Fuzzy* instantâneo, localizado no PAC (Relé 7), com o intuito de evitar ilhamento no sistema elétrico, tendo em vista os problemas que podem ser causados por esta operação. Como exemplo, pode-se citar a violação dos limites de tensão e frequência, bem como as dificuldades geradas no momento da reenergização da rede, tendo em conta uma possível falta de sincronismo, além dos riscos que podem ser gerados ao pessoal da manutenção (WALLING; MILLER, 2002). Desta forma, o relé instantâneo busca a retirada do aerogerador no menor tempo possível, para que o mesmo não venha a interferir no restante do sistema elétrico.

Como dito, neste estudo o cálculo do tempo de atuação do relé foi realizado de forma diferente daquela apresentada na subseção 2.5.2. Para tanto, foi utilizada a Equação 4.1 proposta por Saleh, Moursi e Zeineldin (2015), onde esta fórmula leva em conta, não apenas o módulo da corrente, mas também a magnitude da tensão melhorando, assim, o desempenho dos dispositivos de proteção. Cabe ressaltar que a fórmula original foi alterada usando a norma IEEE C37.112 ao invés da norma IEC 60255-3.

$$t_a = \left(\frac{1}{e^{1-V_{cc}}} \right)^W \times \left(\frac{k_2}{I_r^{k_3} - k_4} + k_1 \right) \times MT \quad (4.1)$$

onde: W é um parâmetro constante e V_{cc} é a tensão de curto-circuito em p.u. medida no secundário do TP.

Na Figura 4.9 é mostrado a implicação do uso desta equação no tempo de atuação.

Percebe-se que quanto maior o valor de W menor será o tempo de atuação.

Figura 4.9: Efeitos do parâmetro W no tempo de atuação com $I_r=4,00$ e $MT=0,50$.

Todos os relés temporizados foram ajustados para o estilo de curva *ANSI Muito Inverso* (Tabela 2.2). Foi definido o valor de 1,50 para a constante W . Além disso, foi estabelecido o valor de 1,00 para o múltiplo de tempo dos Relés 2, 3, 5 e 6. Já os Relés 1 e 4 tiveram o múltiplo de tempo ajustado, respectivamente, em 4,00 e 3,20 de maneira a satisfazer o intervalo de tempo de coordenação de 0,11 s, conforme é apresentado na Tabela 4.2. Para obtenção destes resultados, foram simuladas faltas *close-in* (situada até a 1% do comprimento da linha) em cada relé, onde variou-se, através da alteração do vento base, a potência do aerogerador, considerando, assim, a maior e menor potência que poderia ser entregue pelo GD ($S_{3\phi}=0,21$ MVA e $S_{3\phi}=2,00$ MVA para o vento base de 10 m/s e 24 m/s, respectivamente). Cabe ainda ressaltar que, as relações de transformação dos TCs foram ajustadas em: 100, 10, 10, 60, 30, 10 e 40 para os Relés de 1 a 7, respectivamente.

4.2.2.1 Comparação entre o tempo de atuação com e sem o sistema *fuzzy*

Nesta subseção será realizada uma comparação entre o tempo de atuação com e sem o sistema *fuzzy* por meio de duas tabelas, na qual cada uma contém, também, uma comparação entre a utilização e não-utilização ($W=0,00$) da medição de tensão. Portanto, a Tabela 4.3 apresenta, primeiramente, uma comparação entre o tempo de operação dos dispositivos de proteção com

Tabela 4.2: Tempo de coordenação dos relés com o sistema *fuzzy*

Vento base (m/s)	Local da falta <i>close-in</i>	Relé primário (RP)	Relé secundário (RS)	Tempo RP: $W=1,50$ e <i>fuzzy</i> (s)	Tempo RS: $W=1,50$ e <i>fuzzy</i> (s)	<i>ITC</i> (s)
10	Relé 2	R2	R1	0,0321	0,2441	0,2120
10	Relé 3	R3	R1	0,0317	0,2456	0,2139
10	Relé 4	R4	R1	0,0961	0,2441	0,1480
10	Relé 5	R5	R4	0,0341	0,1797	0,1456
10	Relé 6	R6	R4	0,0316	0,1622	0,1306
24	Relé 2	R2	R1	0,0322	0,2097	0,1775
24	Relé 3	R3	R1	0,0319	0,2097	0,1778
24	Relé 4	R4	R1	0,0875	0,2102	0,1227
24	Relé 5	R5	R4	0,0338	0,1487	0,1149
24	Relé 6	R6	R4	0,0318	0,1473	0,1155

$W=1,50$ e sistema *fuzzy* alterando o valor da corrente de *pick-up* e o tempo encontrado com $W=0,00$ e sistema *fuzzy*. Nestes casos simulados foram aplicados curtos-circuitos bifásicos nos nós 646 e 684, e curtos-circuitos trifásicos nos demais nós após 1 s do início da simulação. As potências aparentes trifásicas do aerogerador no momento anterior a falta para os ventos base de 15 m/s, 18 m/s e 20 m/s são 0,91 MVA, 1,27 MVA e 1,58 MVA, respectivamente.

Tabela 4.3: Tempo de operação dos relés com o sistema *fuzzy*

Vento base (m/s)	Local da falta (nó)	RP	RS	Tempo RP: $W=1,50$ e <i>fuzzy</i> (s)	Tempo RS: $W=1,50$ e <i>fuzzy</i> (s)	Tempo RP: $W=0,00$ e <i>fuzzy</i> (s)	Tempo RS: $W=0,00$ e <i>fuzzy</i> (s)
10	675	R5	R4	0,0505	0,1937	0,1144	0,4385
15	671	R4	R1	0,1591	0,3732	0,4062	0,6470
18	646	R3	R1	0,0939	0,5180	0,1025	0,6464
20	684	R6	R4	0,2153	0,3286	0,1016	0,4330
24	633	R2	R1	0,0751	0,3416	0,1026	0,4777

Com base nos tempos encontrados na Tabela 4.3, pode-se perceber que a maior diferença do tempo de atuação para o relé primário ocorreu no segundo caso, falta no nó 671, quando se leva em conta a medição da tensão (diferença de 0,2471 s). O mesmo ocorreu para o relé secundário remoto, onde a diferença foi de 0,2738 s. Já a menor diferença ocorreu no terceiro caso (0,0086 s) para o relé primário e no quarto caso (0,1044 s) para o relé secundário.

Na Tabela 4.4 é mostrado o tempo de atuação dos relés sem o sistema *fuzzy* alterando o valor da corrente de *pick-up*. Desta forma, as correntes de *pick-up* foram definidas através da análise do fluxo de carga sem a contribuição do GD. Portanto, foram definidos os valores 7,70 A, 10,60 A, 3,40 A, 10,50 A, 7,50 A e 10,50 A para a corrente de *pick-up* dos Relés de 1 a 6, respectivamente. Além disso, o valor da corrente de *pick-up* do Relé 7 foi definida com base no

maior valor de corrente obtido (vento base de 24 m/s). Assim, o valor da corrente de *pick-up* do Relé 7 foi definida em 15,00 A. Cabe ressaltar que para ajustar as correntes de *pick-up* dos relés sem o sistema *fuzzy*, foi considerado uma corrente 30% maior que a corrente de carga nominal do sistema e que as correntes de *pick-up* correspondem as correntes no secundário dos TCs.

Tabela 4.4: Tempo de operação dos relés sem o sistema *fuzzy*

Vento base (m/s)	Local da falta (nó)	RP	RS	Tempo RP: $W=1,50$ (s)	Tempo RS: $W=1,50$ (s)	Tempo RP: $W=0,00$ (s)	Tempo RS: $W=0,00$ (s)
10	675	R5	R4	0,0403	0,3327	0,1247	0,8587
15	671	R4	R1	0,2870	0,7216	0,7841	1,2697
18	646	R3	R1	0,0989	1,1838	0,1083	1,3764
20	684	R6	R4	0,2878	0,6515	0,1044	1,0394
24	633	R2	R1	0,0978	0,6707	0,1028	0,9521

Como pode ser observado na Tabela 4.4, mesmo sem o sistema *fuzzy*, o tempo de atuação do relé com medição de tensão ($W=1,50$) foi menor que o tempo de atuação do relé sem medição de tensão ($W=0,0$). O tempo só foi maior apenas no penúltimo caso (vento base de 20 m/s e falta no nó 684), pois no momento seguinte ao envio do sinal de *trip* do Relé 7 para o disjuntor, ocorre uma sobretensão no ponto em que se encontra o Relé 6, de modo que a tensão atingiu pouco mais de 4,5 p.u., como pode ser visto na Figura 4.10. Cabe ressaltar que tal sobretensão apresentada é um erro de integração do *ATP-EMTP*, tendo em vista que tais valores não são encontrados em sistemas reais.

Figura 4.10: Valores da tensão do Relé 6 e sinal de *trip* dos Relés 6 (vermelho) e 7 (verde).

Outra análise que pode ser feita é comparar o tempo de atuação dos relés primário e secundários de retaguarda com e sem o sistema *fuzzy* e $W=0,00$, ou seja, sem a interferência da medição de tensão. Assim, ao fazer uma comparação entre as duas tabelas, Tabelas 4.3 e 4.4, verifica-se que em 100% dos casos simulados o relé com o sistema *fuzzy* e $W=0,00$ teve um tempo de atuação menor que o relé sem o sistema *fuzzy* e $W=0,00$, onde o maior ganho no tempo de atuação foi de 0,73 s (43,80 ciclos da frequência de 60 Hz) para a falta no nó 646 (relé secundário) e o menor ganho foi de 0,0002 s para a falta no nó 633 (relé primário).

A Tabela 4.5 apresenta o tempo de atuação do Relé 7 (instantâneo) localizado no PAC com e sem o sistema *fuzzy* alterando o valor da corrente de *pick-up*. Ao analisar esta tabela, percebe-se que o maior tempo de atuação com o sistema *fuzzy* foi de 0,0095 s (0,57 ciclos da frequência de 60 Hz) e o menor tempo foi de 0,0069 (0,41 ciclos da frequência de 60 Hz). Já sem o sistema *fuzzy*, para o caso do vento base sendo 10 m/s e a falta localizada no nó 675, percebe-se que o Relé 7 não atua, pois, a contribuição do aerogerador para a falta é menor que a corrente de *pick-up* definida (15,00 A). Além disso, ao comparar os resultados com e sem o sistema *fuzzy*, nota-se que o tempo de atuação do Relé 7 foi maior para os casos em que o sistema *fuzzy* não foi utilizado, significando, portanto, que o relé foi sensibilizado em um tempo maior.

Tabela 4.5: Tempo de operação do Relé 7 com e sem o sistema *fuzzy*

Vento base (m/s)	Local da falta (nó)	Tempo R_7 com <i>fuzzy</i> (s)	Tempo R_7 sem <i>fuzzy</i> (s)
10	675	0,0095	∞
15	671	0,0069	0,0172
18	646	0,0082	0,0184
20	684	0,0069	0,0128
24	633	0,0079	0,0281

A Figura 4.11 mostra as correntes medidas pelos Relés 4, 5 e 7, bem como os seus respectivos valores de corrente de *pick-up*, para um curto-circuito trifásico no nó 675 após 1 s do início da simulação. Com base nos resultados, é possível observar que os valores das correntes de *pick-up* no momento anterior a falta, 7,16 A, 6,52 A e 3,33 A, são atualizados pelo sistema *fuzzy*, no momento em que a falta está ocorrendo, para 5,00 A, 5,45 A e 1,26 A, para os Relés 4, 5 e 7, respectivamente.

4.2.2.2 Variação da resistência de falta

Nesta subseção será tratada a sensibilidade do sistema *fuzzy* perante a variação da resistência de falta. Para tanto, na Tabela 4.6 é apresentado o tempo de atuação dos relés primários (RP) perante a variação da resistência de falta, para faltas trifásicas, bifásicas, bifásicas com terra e monofásicas. As variáveis $TF_{3\emptyset}$, $TF_{2\emptyset}$, $TF_{2\emptyset T}$ e $TF_{1\emptyset}$, representam o tempo de atuação para um curto-circuito trifásico, bifásico, bifásico envolvendo a terra e monofásico, respectivamente.

Figura 4.11: Correntes da fase A no secundário dos TCs, correntes de *pick-up* e sinais de *trip* dos Relés 4, 5 e 7 com o sistema *fuzzy* e $W=1,50$.

Tabela 4.6: Tempo de operação dos relés com o sistema *fuzzy* perante variação da resistência de falta

Resistência de falta (Ω)	Vento base (m/s)	Local da falta (nó)	RP	TF _{3ϕ} (s)	TF _{2ϕ} (s)	TF _{2ϕT} (s)	TF _{1ϕ} (s)
0,001	10	675	R5	0,0528	0,0947	0,0614	0,0771
5				0,4638	0,2013	0,1883	0,4952
25				8,0400	2,2114	1,9678	8,1800
50				∞	9,1056	8,2989	∞
75				∞	64,7327	50,6223	∞
100				∞	∞	∞	∞
0,001	15	671	R4	0,1629	0,2417	0,1865	0,2697
5				2,4109	1,5208	1,2619	2,4016
25				20,9973	10,3329	10,5340	15,5910
50				∞	25,8275	24,0333	>100
75				∞	∞	48,6287	∞
100				∞	∞	∞	∞
0,001	24	675	R5	0,0940	0,1952	0,1500	0,1274

continua na próxima página

Tabela 4.6: Tempo de operação dos relés com o sistema *fuzzy* perante variação da resistência de falta (continuação)

Resistência de falta (Ω)	Vento base (m/s)	Local da falta (nó)	RP	TF _{3$\emptyset$} (s)	TF _{2$\emptyset$} (s)	TF _{2$\emptyset$T} (s)	TF _{1$\emptyset$} (s)
5	24	675	R5	0,4933	0,2485	0,2094	0,5260
25				9,0605	2,4418	2,1576	10,1381
50				∞	11,6088	10,4870	∞
75				∞	53,8697	50,6250	∞
100				∞	∞	∞	∞
0,001	18	646	R3	*	0,0928	0,0970	0,0871
5				*	0,1049	0,1010	0,1200
25				*	0,1740	0,1577	0,3984
50				*	0,3771	0,3147	1,1225
75				*	0,6852	0,5511	2,2881
100				*	1,1012	0,8653	4,1318
200				*	4,4885	3,1583	∞
300				*	∞	9,7963	∞
0,001	20	684	R6	*	0,2284	0,2128	0,1126
5				*	0,1298	0,1067	0,1600
25				*	0,2413	0,1818	0,4627
50				*	0,5703	0,4314	1,2971
75				*	1,0769	0,7846	2,6754
100				*	1,7807	1,2569	4,7897
200				*	9,1617	4,9900	∞
300				*	∞	18,7993	∞
0,001	24	633	R2	0,0845	0,1386	0,0985	0,0916
5				0,1995	0,1586	0,1291	0,1661
25				1,4905	0,6206	0,5345	1,5553
50				4,9869	1,7155	1,5018	5,3449
75				13,2450	3,3097	2,9523	14,4283
100				49,5807	5,5940	5,0486	61,8593
200				∞	34,3860	52,6770	∞
300				∞	∞	∞	∞
0,001	24	671	R4	0,1560	0,2419	0,1772	0,3023
5				1,9566	0,9533	0,8207	2,3042
25				7,5029	5,0158	4,6532	10,5460

continua na próxima página

Tabela 4.6: Tempo de operação dos relés com o sistema *fuzzy* perante variação da resistência de falta (continuação)

Resistência de falta (Ω)	Vento base (m/s)	Local da falta (nó)	RP	TF ₃₀ (s)	TF ₂₀ (s)	TF _{20T} (s)	TF ₁₀ (s)
50	24	671	R4	∞	8,3324	7,0595	13,7527
75				∞	10,4387	8,6726	∞
100				∞	12,6060	10,1987	∞
200				∞	12,9290	11,0477	∞
300				∞	14,8710	12,8850	∞

* não aplicável

Como pode ser observado na Tabela 4.6, para faltas mais próximas ao barramento infinito (nós 633 e 646), o sistema *fuzzy* conseguiu atuar corretamente até uma resistência de falta de 100 Ω para todos os tipos de faltas. Já para os curtos-circuitos mais distantes, como no nó 675, a maior resistência de falta em que a proteção atuou corretamente, para todos os tipos de faltas, foi de 25 Ω . Além disso, nota-se também que, variando a potência do aerogerador, pode-se aumentar ou diminuir a sensibilidade do relé para alguns tipos de curtos-circuitos, como por exemplo as faltas no nó 671. Porém, essa maior ou menor sensibilidade pode não ocorrer em outros locais de faltas, como por exemplo no nó 675. Assim, cabe ser realizado estudos caso a caso, para a verificação da utilização do sistema *fuzzy* na eliminação de faltas de alta impedância.

4.2.2.3 Comportamento do sistema *fuzzy* perante a energização de motores

Nesta subseção será tratado o comportamento do sistema *fuzzy* perante a energização de motores. Para tanto, será verificada a maior potência do motor que pode ser inserido em um determinado nó do sistema teste sem que haja a abertura do sistema elétrico pelo disjuntor. Assim, a Tabela 4.7 apresenta as potências máximas dos motores que pode ser inserido em cada nó do sistema em estudo, onde os dados dos motores foram retirados de catálogos correspondente a motores de 2 polos encontrados no mercado. Os motores foram conectados ao sistema elétrico por meio de um transformador com conexão estrela do lado de alta tensão (2,4 kV fase-neutro) e

Tabela 4.7: Potência máxima do motor que pode ser inserido no sistema

Nó	Potência do motor (HP)
632	650
633	100
671	270
675	150
692	150

estrela do lado de baixa tensão (220 fase-neutro). Além disso, foi definido que o aerogerador entregará sua maior potência, ou seja, o vento base foi fixado em 24 m/s.

Com base nos resultados da Tabela 4.7 é possível verificar que os relés que possuem um múltiplo de tempo maior são os que admitem a inserção de motores com maior potência. Portanto, caso haja a necessidade da utilização de motores de potência maior, pode-se aumentar o valor do múltiplo de tempo. Porém, vale ressaltar que o aumento do valor do múltiplo de tempo acarreta em um tempo maior de eliminação da falta. Ainda em tempo, cabe frisar que não foi verificado se a inserção destes motores ocasionaria problemas no que se refere a Qualidade da Energia Elétrica, visto que poderia ocorrer afundamentos de tensão no momento da partida.

As Figuras 4.12 e 4.13 mostram os valores de diversos parâmetros do Relé 2 e do motor elétrico sob operação. No primeiro caso, Figura 4.12, o Relé 2 atua indevidamente 1,81 s após a energização do motor elétrico de 125 HP. A velocidade e o torque absoluto máximo do motor foram 200,8 rad/s e 641 Nm, respectivamente. Porém, esses valores tendem a zero após o fim da simulação devido a abertura do disjuntor do relé 2. Já no segundo caso, Figura 4.13, é ilustrado uma situação ideal, pois não houve nenhuma abertura indevida. Para tanto, foi utilizado um motor de 100 HP cuja a velocidade final foi de 369,6 rad/s e o torque absoluto foi de 645 Nm. Este motor entrou em regime permanente em 1,20 s após o início da simulação. Para este caso, apesar do relé ter sido sensibilizado no início da energização do motor, o mesmo não atuou, pois,

Figura 4.12: Valores da corrente de *pick-up* e da corrente medida pelo relé (Fase B), velocidade, torque e corrente do motor de 125 HP (Fase B), bem como o sinal de *trip* - relé atuando.

o tempo em que a corrente de partida ficou acima do valor da corrente de *pick-up* foi menor que o tempo necessário para acionar o *trip* de abertura do disjuntor.

Figura 4.13: Valores da corrente de *pick-up* e da corrente medida pelo relé (Fase B), velocidade, torque e corrente do motor de 100 HP (Fase B), bem como o sinal de *trip* - relé não atuando.

Ainda em tempo, cabe comentar que foi testado a energização de transformadores, mas, em todos os casos, o relé atuou. Assim, se torna necessário, para estes casos, a implementação de uma restrição harmônica visando a não operação do mesmo no momento da energização do transformador. Isso só é possível pois, durante a energização do transformador, a harmônica de segunda ordem se torna predominante. Já durante as situações de falta, a frequência fundamental é a componente predominante (VIEIRA, 2013).

4.2.3 Estudo 3

Este estudo tem como objetivo mostrar o comportamento do relé proposto em sistemas de transmissão, bem como os ganhos obtidos com o uso da teleproteção. Para tanto, foram utilizados relés de sobrecorrente com Lógica *Fuzzy* temporizados de tempo inverso direcionais com teleproteção para a proteção do sistema teste de transmissão de 14 barras. Neste sistema (Figura 4.14) as cargas foram substituídas por impedância constante (Tabela 4.8) e os *taps* de todos os transformadores de potência foram definidos como sendo nominais. Demais informações sobre esse sistema elétrico podem ser vistas em (IEEE, 2016).

Nesta simulação foi utilizado de quatorze relés, os quais foram alocados conforme a Figura 4.14. O fato de ser utilizado, neste estudo, de um esquema de teleproteção, bem como o

Figura 4.14: Sistema teste utilizado no Estudo 3.

Tabela 4.8: Dados da carga - Estudo 3

Barra	Modelo	Resistência (p.u.)	Reatância (p.u.)
2	Estrela	3,7484	2,1938
3	Estrela	1,0406	0,2099
4	Delta	6,4738	-1,8932
5	Delta	39,3255	8,2790
6	Delta	21,1727	14,1781
9	Estrela	2,8710	1,6156
10	Delta	26,0155	16,7656
11	Estrela	25,2445	12,9829
12	Estrela	17,0718	4,4778
13	Delta	20,6824	8,8857
14	Estrela	6,4743	2,1726

fato dos relés com sistema *fuzzy* possuírem uma característica própria de operação, permite que seja adotado somente um único estilo de curva (*IEC* Extremamente Inverso - Tabela 2.1) para todos os relés, porém variando-se o *MT* conforme é apresentado na Tabela 4.9. Tal peculiaridade não pode ser reproduzida nos relés convencionais sem teleproteção, pois, caso seja adotada, poderá resultar em descoordenação ou tempos muito elevados de atuação.

Tabela 4.9: Múltiplos de tempo utilizados nos relés com Lógica *Fuzzy*

Relé	<i>MT</i>	Relé	<i>MT</i>
R1	0,05	R8	0,05
R2	0,12	R9	0,15
R3	0,15	R10	0,15
R4	0,07	R11	0,05
R5	0,20	R12	0,12
R6	0,10	R13	0,10
R7	0,12	R14	0,07

Além disso, as relações de transformação dos TCs foram ajustadas de modo que a corrente em seu secundário não ultrapasse os 100 A. Desta forma, a Tabela 4.10 apresenta os valores das correntes medidas no primário dos TCs em regime permanente, as correntes de curtos-circuitos trifásicos *Close-in* e as relações de transformação dos TCs.

Conforme apresentado na subseção 3.4.9.4, o esquema de teleproteção implementado permite fixar um valor para o *ITC* de modo que o relé secundário só atue, em caso de falha do relé primário, após atingindo esse valor. Desta forma, neste estudo, o *ITC* foi ajustado em 150 ms.

A Tabela 4.11 apresenta os tempos de abertura dos relés implementados com a Lógica *Fuzzy* e a teleproteção. Percebe-se que caso haja uma falha de abertura do relé primário, o relé secundário sempre irá abrir com um tempo próximo de 150 ms.

Tabela 4.10: Dados do sistema de proteção

Relé	Corrente de carga (A_{rms})	Corrente de curto-circuito (A_{rms})	Relação de transformação
R1	69,15	3.755	200:5
R2	11,45	5.749	300:5
R3	69,15	3.627	200:5
R4	11,45	2.007	150:5
R5	13,70	1.908	100:5
R6	8,76	2.089	150:5
R7	13,70	624	50:5
R8	34,33	1.152	75:5
R9	34,33	1.219	75:5
R10	7,28	946	50:5
R11	7,28	2.151	150:5
R12	29,76	2.300	150:5
R13	8,76	527	50:5
R14	29,76	617	50:5

Tabela 4.11: Tempo de atuação para faltas *Close-in* (Relé primário e relé secundário) e *ITC* - Relés com o sistema *fuzzy* e a teleproteção

Relé		Tempo relé primário (s)	Tempo relé secundário (s)	<i>ITC</i>
RP	RS			
R1	R4	0,0126	0,1637	0,1511
R2	R3	0,0137	0,1648	
R3	-	0,0178	-	
R4	R7 R13	0,0137	0,1648	
R5	R2 R13	0,0147	0,1658	
R6	R2 R7	0,0147	0,1658	
R7	R9	0,0178	0,1689	
R8	R5	0,0189	0,1700	
R9	-	0,0272	-	
R10	-	0,0147	-	
R11	R14	0,0126	0,1637	
R12	R10	0,0158	0,1669	
R13	R12	0,0189	0,1700	
R14	R6	0,0314	0,1825	

Buscando comparar os tempos de abertura dos relés primários e secundários, foi retirado a Lógica *Fuzzy* e a teleproteção destes dispositivos, tornando-os, desta maneira, convencionais. Como dito anteriormente, não é viável a coordenação de relés convencionais utilizando somente um estilo de curva. Desta forma, adotou-se os estilos de curva e os *MT* apresentado na Ta-

bela 4.12. Tais valores foram obtidos através do algoritmo *EPSO* (*Evolutionary Particle Swarm Optimization*) que visa a minimização do tempo de atuação dos Relés de Sobrecorrente, além de atender a seletividade entre os dispositivos, por meio de uma estratégia evolutiva baseada no movimento de partículas em um espaço de busca (BERNARDES et al., 2013).

Tabela 4.12: Dados utilizados nos relés sem o sistema *fuzzy*

Relé	Corrente de <i>pick-up</i> (A_{rms})	MT	Estilo de curva	Relé	Corrente de <i>pick-up</i> (A_{rms})	MT	Estilo de curva
R1	186,80	0,05	EI	R8	58,00	0,05	EI
R2	285,00	0,05	IP	R9	60,90	0,36	EI
R3	232,40	0,30	EI	R10	68,60	0,11	EI
R4	100,80	0,05	MI	R11	107,70	0,05	EI
R5	227,60	0,05	EI	R12	132,90	0,05	MI
R6	104,70	0,09	EI	R13	26,40	0,39	EI
R7	44,10	0,31	EI	R14	50,10	0,38	EI

EI – Extremamente Inverso; IP – Inverso Padrão; MI – Muito Inverso

Assim, a Tabela 4.13 apresenta os tempos de abertura dos relés convencionais. Percebe-se que neste caso, como não há um esquema de teleproteção, o *ITC* não é constante, pois o tempo de abertura depende dos parâmetros inseridos em cada relé e da corrente do sistema elétrico. Além disso, ao comparar as Tabelas 4.11 e 4.13 verifica-se que somente os relés convencionais

Tabela 4.13: Tempo de atuação para faltas *Close-in* (Relé primário e relé secundário) e *ITC* - Relé convencional

Relé RP	Relé RS	Tempo relé primário (s)	Tempo relé secundário (s)	<i>ITC</i>
R1	R4	0,0100	0,3737	0,3437
R2	R3	0,1134	0,2631	0,1497
R3	-	0,1019	-	-
R4	R7	0,0356	0,1894	0,1538
	R13		0,2081	0,1725
R5	R2	0,0577	1,0920	1,0343
	R13		0,2081	0,1504
R6	R2	0,0181	1,0920	1,0739
	R7		0,1849	0,1668
R7	R9	0,1244	0,2775	0,1531
R8	R5	0,0101	0,1594	0,1493
R9	-	0,0723	-	-
R10	-	0,0458	-	-
R11	R14	0,0101	0,1594	0,1493
R12	R10	0,0414	0,1908	0,1494
R13	R12	0,0785	0,2279	0,1494
R14	R6	0,0410	0,2061	0,1651

primários R1, R8 e R11 apresentam tempos de abertura menor que os relés com a Lógica *Fuzzy* e a teleproteção. Já analisando os relés convencionais secundários, verifica-se que somente os relés R5 e R14 (retaguarda de R8 e R11, respectivamente) tiveram tempos de abertura menor que os relés com o sistema *fuzzy*. Cabe salientar que, se fosse utilizado de um esquema de teleproteção nos relés convencionais, somente o relé secundário R4 (retaguarda de R1) seria acrescentado nesta lista.

A Figura 4.15 mostra os tempos de abertura para uma falta *close-in* em R6 com falha do disjuntor deste relé. Nota-se que o primeiro relé a enviar o sinal de *trip* ao disjuntor é o relé R6. Neste mesmo instante é enviado um sinal para o relé que se encontra no extremo oposto da linha de transmissão (R13). Como houve uma falha na abertura do disjuntor do relé R6, após o tempo do *ITC*, é enviado um sinal para os relés R2 e R7 abrirem (secundários de R6). Estes, por sua vez, enviam um sinal para os relés no extremo oposto de suas respectivas linhas de transmissão (R4 e R5) de forma a isolar as duas extremidades da linha. Apesar do esquema de redundância, tal ação acarreta em uma maior segurança na operação do sistema elétrico. Ainda em tempo, cabe ressaltar que a diferença de tempo entre os *trips* apresentada na figura, é função do passo do programa *ATP*.

Figura 4.15: Tempo da aplicação da falta e sinais de *trip* dos relés R2, R4, R5, R6, R7 e R13.

4.3 Considerações Finais

Após a realização dos estudos, que teve como enfoque principal analisar o comportamento e desempenho do relé de sobrecorrente com a Lógica Fuzzy alterando o valor da corrente de *pick-up*, foi possível constatar a eficácia do dispositivo implementado quanto a eliminação das faltas propostas.

Os resultados destes estudos permitiram concluir que os problemas relacionados a uma geração intermitente podem ser contornados através da instalação dos relés de sobrecorrente

com Lógica *Fuzzy*, pois, como pode ser observado nos resultados, tal modelo conseguiu sanar todas as faltas simuladas.

Para diversos tipos de falta, também foi abordada a influência da resistência de falta no sistema de proteção. Dependendo de sua magnitude e o ponto de falta aplicado, o relé não enxerga adequadamente a corrente de falta. Assim, estudos mais profundos podem ser conduzidos a fim de satisfazer também faltas de alta impedância.

Por fim, o uso da unidade direcional, teleproteção e adaptações no cálculo do tempo de atuação (como por exemplo o uso da tensão do sistema) pode resultar em menores tempos de atuação do relé, o que acarreta um aumento na confiabilidade e na segurança do sistema elétrico.

5 CONCLUSÃO

Apesar de todos os capítulos anteriores possuírem comentários conclusivos, ainda se faz importante uma abordagem global das principais constatações alcançadas, de modo a proporcionar uma visão rápida e sucinta dos assuntos abordados e dos objetivos e resultados alcançados.

O Capítulo 1 mostrou os motivos da utilização do relé de sobrecorrente com a Lógica *Fuzzy* alterando o valor da corrente de *pick-up* na questão de melhorar o sistema de proteção. A seguir, procedeu-se uma revisão sobre o estado da arte onde foi apresentado estudos de relés que utilizam a Lógica *Fuzzy*, bem como a questão da proteção adaptativa. Também foi apresentado estudos que realizam modelagens de relés no programa *ATP-EMTP*. Desta forma, após tal levantamento, foi situada a estrutura deste trabalho juntamente com os objetivos gerais.

O Capítulo 2 apresentou uma abordagem geral sobre o sistema de proteção mostrando as categorias dos relés mais utilizados no sistema elétrico, bem como os termos empregados pela literatura. Além disso, foi feita uma explanação sobre a proteção digital onde foi apresentado os benefícios do seu uso e a sua arquitetura. Também foi visto que, graças ao emprego da proteção digital, é possível adotar medidas adaptativas na proteção do sistema elétrico, como por exemplo a Lógica *Fuzzy* apresentada neste trabalho. Finalizando o capítulo, foi mostrada as principais características sobre a proteção de linhas de transmissão, bem como a proteção de linhas de distribuição. Ademais, foi exposto as vantagens e desvantagens da utilização dos elementos instantâneo, temporizado e direcional nos relés de sobrecorrente, tal como da utilização da teleproteção.

O Capítulo 3 elucidou a implementação do relé de sobrecorrente com Lógica *Fuzzy*. Porém, primeiramente foi feita uma introdução ao *software ATP-EMTP*, onde foi apresentado a estrutura da linguagem MODELS (linguagem empregada ao longo de todo o trabalho). Posteriormente foi apresentada a aplicação da Lógica *Fuzzy* no relé de sobrecorrente, aonde foi exposto os termos de cada variável utilizada, bem como as regras e operadores utilizados na sua concepção. Também foi mostrado como é feito a integração da unidade direcional e da teleproteção no relé de sobrecorrente com Lógica *Fuzzy*, que apesar de não ser necessária para o funcionamento do relé, se torna essencial em algumas situações, como descrito e mostrado ao longo do trabalho.

O Capítulo 4 mostrou a aplicação do relé de sobrecorrente com a Lógica *Fuzzy* alterando o valor da corrente de *pick-up* por meio de três estudos de caso:

- O Estudo 1 teve como objetivo verificar o funcionamento do relé proposto, bem como a redução do tempo de atuação do relé. Com base neste estudo, concluiu-se que o relé com Lógica *Fuzzy* apresentou uma redução expressiva nos tempos de atuação se comparado com o relé convencional, principalmente quando a carga do sistema elétrico era pequena.

- Após tendo verificado o seu correto funcionamento, foi realizado o Estudo 2 que teve como objetivo demonstrar o funcionamento do relé proposto em sistemas com GD. Neste estudo, concluiu-se que é de grande necessidade a utilização de relé adaptativo no PAC, tendo em vista que um relé convencional não garante sensibilidade para toda a variação da potência do GD. Além disso, verificou-se que o uso de adaptações no cálculo do tempo de atuação pode melhorar a performance do equipamento. Também, neste estudo, foi verificado que o relé implementado pode ser utilizado em sistemas com elevada resistência de falta, porém cabe ressaltar que a sua aplicação fica limitada a estudos prévios devido à grande variação de sua sensibilidade. Além disso, foi constatado o uso em sistemas com energização de motores, onde se torna somente necessário o ajuste do múltiplo de tempo caso seja exigido a utilização de grandes motores.
- Tendo constatado o funcionamento do relé com Lógica *Fuzzy* em sistemas de distribuição, se fez necessário comprovar, também, o seu funcionamento no sistema de transmissão. Assim foi visto que o uso de tal equipamento permite reduzir o tempo de atuação dos relés e com isso aumentar a potência transportada pelas linhas de transmissão, resultando, assim, em menores investimentos em novas linhas e em novos equipamentos. Além disso, foi visto que o uso do esquema de teleproteção permite menores tempos de atuação do relé secundário, o que implica maior segurança e estabilidade no sistema elétrico.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a técnica apresentada se tornou uma alternativa aos relés convencionais, tendo em vista os ganhos apresentados neste trabalho. Ademais, a Lógica *Fuzzy* pode ser utilizada em *hardwares* cujo poder de processamento e de espaço de memória são limitados, o que facilita, assim, sua aplicação em relés digitais.

Cabe comentar, que durante o trabalho foram encontradas dificuldades na modelagem dos TCs, tanto que não foi empregado a saturação do mesmo durante as simulações. Tal fato se deve aos erros encontrados nos terminais secundários, pois em alguns casos apresentavam valores corretos, porém em outros apresentavam valores totalmente fora do previsto. Também foram encontrados certos obstáculos no equacionamento do Estimador de Fasor (Filtro Cosseno Modificado), uma vez que havia divergências, nas equações, entre os autores consultados. O tratamento dos valores dos ângulos obtidos pelo Estimador de Fasor, para a determinação da direcionalidade, também se tornou trabalhoso. Ademais, a escolha da quantidade de termos linguísticos da Lógica *Fuzzy* e dos seus valores e formas também trouxe certa dificuldade para este trabalho.

A continuidade desta pesquisa pode investigar os seguintes aspectos:

- Coordenação deste dispositivo com outros equipamentos, tais como fusíveis e religadores nas linhas de distribuição e relés de distância e/ou de sobrecorrente nas linhas de transmissão;

- Implementação da Lógica *Fuzzy* em algum *hardware* de modo que seja possível acoplar no relé de sobrecorrente, ou a sua implementação diretamente neste dispositivo;
- Estudos em sistemas reais visando refinar a quantidade e valores dos parâmetros da Lógica *Fuzzy*.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, A. M. de; SANTO, S. G.; MONARO, R. M. Modelagem de relés de proteção para atp. In: **VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**. Natal, Brasil: [s.n.], 2016. p. 1–6.
- ALVARENGA, M. T. S. **Modelagem e Simulação da Proteção Diferencial de Alta Impedância de Barramento no Software ATP**. Dez. 2014. 100 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, Dez. 2014.
- AMON FILHO, J.; PEREIRA, M. P. **Curso básico sobre a utilização do ATP**. [S.l.], 1994. 190 p.
- BERNARDES, W. M. S.; SANTOS, F. M. P.; ASADA, E. N.; SOUZA, S. A.; RAMOS, M. J. Application of Discrete PSO and Evolutionary PSO to the coordination of directional overcurrent relays. In: **2013 IEEE XVII International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–6.
- BONELLI, A. F. **Modelagem e Simulação de Unidade Eólica para Estudos de Indicadores de Qualidade da Energia Elétrica**. Jun. 2010. 199 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, Jun. 2010.
- CAMINHA, A. C. **Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos**. 1. ed. São Paulo, Brasil: Edgard Blücher, 1977. 224 p. ISBN 8521201362.
- CODLING, J. D.; HOUSE, S. A.; JOICE, J. H.; LABHART, K. M.; RICHARDS, J. R.; TENBUSCH, J. E.; TULLIS, M. D.; WILKERSON, T. D.; ROSTAMKOLAI, N. Adaptive relaying. A new direction in power system protection. **IEEE Potentials**, v. 15, n. 1, p. 28–33, Fev. 1996. ISSN 0278-6648.
- COFFELE, F.; BOOTH, C.; DYSKO, A. An adaptive overcurrent protection scheme for distribution networks. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 30, n. 2, p. 561–568, Abr. 2015. ISSN 0885-8977.
- CONCEICAO, E. N.; SILVA, K. M. Modeling and simulation of the protection of distribution feeders in atp. **IEEE Latin America Transactions**, v. 13, n. 5, p. 1392–1397, Maio 2015. ISSN 1548-0992.
- CORRÊA, R. **Otimização da Coordenação de Relés de Sobrecorrente Direcionais em Sistemas Elétricos de Potência Utilizando a Programação Inteira Binária**. Fev. 2012. 91 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, Fev. 2012.
- COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. **Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: dos Relés Eletromecânicos aos Microprocessados Inteligentes**. 1. ed. São Carlos, Brasil: Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, 2011. 378 p. ISBN 978-85-85205-78-2.
- ELÉTRICO, O. S. **Desafios na proteção de microrredes**. 2017. Disponível em: <<http://www.osetoreletrico.com.br/2016/2017/02/24/desafios-na-protecao-de-microrredes/>>. Acesso em: 02 maio 2017.

FERRER, H. J. A.; SCHWEITZER, E. O. **Modern Solutions for Protection, Control, and Monitoring of Electric Power Systems**. [S.l.]: Schweitzer Engineering Laboratories, 2010. ISBN 9780972502634.

David G. Hart, Damir Novosel e Robert A. Smith. **Modified Cosine Filters**. 2000. US6154687 A.

HEWITSON, L.; BROWN, M.; BALAKRISHNAN, R. **Practical Power System Protection**. 1. ed. Burlington, MA: Newnes, 2004. 288 p. ISBN 978-0750663977.

HØIDALEN, H. K. **ATPDraw: The graphical preprocessor to ATP Electromagnetic Transients Program**. Disponível em: <<http://www.atpdraw.net/help.php>>. Acesso em: 05 maio 2017.

HOROWITZ, S. H.; PHADKE, A. G.; THORPE, J. S. Adaptive transmission system relaying. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 3, n. 4, p. 1436–1445, Out. 1988. ISSN 0885-8977.

IEC. **Electrical relays - Part 20: Protection (protective) systems**. 1. ed. [S.l.], 1984. 57 p.

_____. **Electrical relays - Part 3: Single input energizing quantity measuring relays with dependent or independent time**. 2. ed. [S.l.], 1989. 19 p.

IEEE. IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays. **IEEE Std. C37.112-1996**, p. i–, 1997.

IEEE. **Distribution Test Feeders (Power & Energy Society)**. 2013. Disponível em: <<http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/index.html>>. Acesso em: 02 maio 2017.

IEEE. **Power Systems Test Case Archive (University of Washington)**. 2016. Disponível em: <<https://www2.ee.washington.edu/research/pstca/>>. Acesso em: 02 maio 2017.

IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers. **IEEE Std C57.13-2016 (Revision of IEEE Std C57.13-2008)**, p. 1–96, June 2016.

JANTZEN, J. **Foundations of Fuzzy Control**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007. 230 p. ISBN 978-0-470-02963-3.

KUMAR, D. S.; RADHAKRISHNAN, B. M.; SRINIVASAN, D.; REINDL, T. An adaptive fuzzy based relay for protection of distribution networks. In: **Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), 2015 IEEE International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6.

LIU, Y.; GAO, H.; XIANG, M.; WEI, X.; WEI, P.; ZHOU, C. Performance testing of complete digital relays based on atp-empt and iec61850-9-2. In: **Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011 4th International Conference on**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 83–87.

LOPES, F.; BARROS, D.; REIS, R.; COSTA, C. da; NASCIMENTO, J.; BRITO, N.; NEVES, W.; MORAES, S. Influência de métodos de estimação fasorial no processo de análise de faltas no sistema CHESF. In: **XI Conferência Brasileira Sobre Qualidade da Energia Elétrica**. Campina Grande, Brasil: Sociedade Brasileira de Qualidade da Energia Elétrica, 2015. p. 1–6.

MAHAT, P.; CHEN, Z.; BAK-JENSEN, B.; BAK, C. L. A simple adaptive overcurrent protection of distribution systems with distributed generation. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 2, n. 3, p. 428–437, Set. 2011. ISSN 1949-3053.

MANSOUR, M. M.; MEKHAMER, S. F.; EL-KHARBAWE, N. A modified particle swarm optimizer for the coordination of directional overcurrent relays. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 22, n. 3, p. 1400–1410, Jul. 2007. ISSN 0885-8977.

MOSTAFA, Y. G.; ALY, M. S. Neural network based overcurrent voltage controlled protection system in large electrical networks. In: **PowerTech, 2009 IEEE Bucharest**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–6.

OLIVEIRA, N. L. S.; SOUZA, B. A. de. Effects of the exponentially decaying dc offset in the phasor estimation algorithms performance. In: **2012 Sixth IEEE/PES Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T D-LA)**. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–5.

PANEZ, J.; TAVARES, M. C. Modelagem de um relé de proteção direcional de linha de transmissão no ATP. In: **VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**. Natal, Brasil: [s.n.], 2016. p. 1–6.

PATYRA, M. J.; MLYNEK, D. M. **Fuzzy Logic: Implementation and applications**. New York, USA: John Wiley & Sons, 1996. 340 p. ISBN 978-0-471-95059-2.

PEREZ, S. G. A. **Modeling Relays for Power System Protection Studies**. Jul. 2006. 319 p. Tese (Doutorado) — Universidade de Saskatchewan, Saskatchewan, Canadá, Jul. 2006.

PHADKE, A. G.; THORP, J. S. **Computer Relaying for Power Systems**. 2. ed. Chichester, Reino Unido: John Wiley & Sons, 2009. 326 p. ISBN 978-0470057131.

REBIZANT, W.; SOLAK, K.; WISZNIEWSKI, A.; KLIMEK, A. Fuzzy inference supported current differential protection for hv transmission lines. In: **10th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2010). Managing the Change**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–5.

RUSH, P. **Proteção e Automação de Redes: conceito e aplicação**. 1. ed. São Paulo, Brasil: Edgard Blücher, 2011. 526 p. ISBN 978-85-212-0528-9.

SALEH, K. A.; MOURSI, M. S. E.; ZEINELDIN, H. H. A new protection scheme considering fault ride through requirements for transmission level interconnected wind parks. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 11, n. 6, p. 1324–1333, Dez. 2015. ISSN 1551-3203.

SILVA, K. M.; ALMEIDA, M. L. S. Filtro de memória de tensão de sequência positiva para uso em relés numéricos microprocessados. In: **VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**. Natal, Brasil: [s.n.], 2016. p. 1–6. ISSN 2177-6164.

SILVEIRA, J. G.; FORMIGA, L. E. P.; MEDEIROS, E. B.; COLAÇO, A. L. Sistema para seleção automática de grupos de ajustes de relés de proteção do sistema elétrico. In: **XVIII Congresso Brasileiro de Automática**. Bonito, Brasil: Sociedade Brasileira de Automática, 2010. p. 2816–2823.

SIMOES, M. G.; SHAW, I. S. **Controle e Modelagem Fuzzy**. 2. ed. [S.l.]: Edgard Blücher, 2007. 200 p. ISBN 978-85-2120-416-9.

SOUZA, M. P. M. G. **Coordenação da Proteção de um Sistema Elétrico de Potência Interligado Utilizando Relés de Sobrecorrente e de Distância**. Set. 2010. 2010. 153 p. Monografia — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, Set. 2010.

TAVARES, K. A. **Modelagem e Simulação da Proteção Diferencial de Transformadores de Potência no ATP**. Dez. 2013. 108 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, Dez. 2013.

VIANNA, P. de L. **Modelagem e Simulação da Proteção Diferencial de Baixa Impedância de Barramentos no Software ATP**. Dez. 2013. 87 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, Dez. 2013.

VIEIRA, C. T. **Ferramentas Inteligentes Aplicadas à Proteção Diferencial de Transformadores de Potência**. Ago. 2013. 2013. 105 p. Monografia — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, Ago. 2013.

WALLING, R. A.; MILLER, N. W. Distributed generation islanding-implications on power system dynamic performance. In: **IEEE Power Engineering Society Summer Meeting**,. [S.l.: s.n.], 2002. v. 1, p. 92–96.

Apêndices

APÊNDICE A – MODELS UTILIZADAS NA IMPLEMENTAÇÃO DO RELÉ DE SOBRECORRENTE COM LÓGICA *FUZZY* TEMPORIZADO DE TEMPO INVERSO DIRECIONAL COM TELEPROTEÇÃO

A seguir serão apresentados os códigos completos utilizados nas MODELS para a implementação do relé de sobrecorrente com Lógica *Fuzzy* temporizado de tempo inverso direcional com Teleproteção.

A.1 Transdutores

Algoritmo 23: Código da MODELS Transdutor

```

MODEL TRCOTE
  INPUT
    I_pri[1..3]
    V_pri[1..3]
  OUTPUT
    X_sec[1..6]
    RE_TC
    RE_TP
  DATA
    R_TC
    R_TP
  VAR
    X_sec[1..6]
    RE_TC
    RE_TP
  INIT
    X_sec[1..6] := 0
    RE_TC := 0
    RE_TP := 0
  ENDINIT
  EXEC
    X_sec[1] := (I_pri[1] / R_TC)
    X_sec[2] := (I_pri[2] / R_TC)
    X_sec[3] := (I_pri[3] / R_TC)
    X_sec[4] := (V_pri[1] / R_TP)
    X_sec[5] := (V_pri[2] / R_TP)
    X_sec[6] := (V_pri[3] / R_TP)
    RE_TC := R_TC
    RE_TP := R_TP
  ENDEXEC
ENDMODEL

```

A.2 Transformador Auxiliar

Algoritmo 24: Código da MODELS Transformador Auxiliar

```

MODEL TRAUCT
  INPUT
    X_sec[1..6]
    RE_TC
    RE_TP
  OUTPUT
    V_saida[1..6]
    R_sec[1..2]
  DATA
    I_pri
    V_pri
  VAR
    V_saida[1..6]
    R_sec[1..2]
  CONST
    Vm_saida{val:10.0}
  INIT
    V_saida[1..6]:=0
    R_sec[1] := (Vm_saida * RE_TC) / I_pri
    R_sec[2] := (Vm_saida * RE_TP) / V_pri
  ENDINIT
  EXEC
    V_saida[1] := X_sec[1] * R_sec[1]
    V_saida[2] := X_sec[2] * R_sec[1]
    V_saida[3] := X_sec[3] * R_sec[1]
    V_saida[4] := X_sec[4] * R_sec[2]
    V_saida[5] := X_sec[5] * R_sec[2]
    V_saida[6] := X_sec[6] * R_sec[2]
  ENDEXEC
ENDMODEL

```

A.3 Filtro Analógico

Algoritmo 25: Código da MODELS Filtro Analógico

```

MODEL FILANA
  INPUT
    V_saida[1..6]
  OUTPUT
    Vf_saida[1..6]
  VAR
    Vf_saida[1..6]
  CONST
    b0{val:1.6452e9}
    a0{val:1.6452e9}

```

```

a1{val:2.7873e6}
a2{val:2.3611e3}
a3{val:1.0}
HISTORY
  Vf_saida[1..6]{dflt:0}
EXEC
  LAPLACE (Vf_saida[1] / V_saida[1]) := b0ls0 / (a0ls0 + a1ls1 + a2ls2 + a3ls3)
  LAPLACE (Vf_saida[2] / V_saida[2]) := b0ls0 / (a0ls0 + a1ls1 + a2ls2 + a3ls3)
  LAPLACE (Vf_saida[3] / V_saida[3]) := b0ls0 / (a0ls0 + a1ls1 + a2ls2 + a3ls3)
  LAPLACE (Vf_saida[4] / V_saida[4]) := b0ls0 / (a0ls0 + a1ls1 + a2ls2 + a3ls3)
  LAPLACE (Vf_saida[5] / V_saida[5]) := b0ls0 / (a0ls0 + a1ls1 + a2ls2 + a3ls3)
  LAPLACE (Vf_saida[6] / V_saida[6]) := b0ls0 / (a0ls0 + a1ls1 + a2ls2 + a3ls3)
ENDEXEC
ENDMODEL

```

A.4 Grampeador

Algoritmo 26: Código da MODELS Grampeador

```

MODEL GRAMPE
INPUT
  Vf_saida[1..6]
OUTPUT
  Vg_saida[1..6]
VAR
  Vg_saida[1..6]
INIT
  Vg_saida[1..6] := 0
ENDINIT
EXEC
  IF abs(Vf_saida[1])>10 THEN
    Vg_saida[1] := 10 * sign(Vf_saida[1])
  ELSE
    Vg_saida[1] := Vf_saida[1]
  ENDIF
  IF abs(Vf_saida[2])>10 THEN
    Vg_saida[2] := 10 * sign(Vf_saida[2])
  ELSE
    Vg_saida[2] := Vf_saida[2]
  ENDIF
  IF abs(Vf_saida[3])>10 THEN
    Vg_saida[3] := 10 * sign(Vf_saida[3])
  ELSE
    Vg_saida[3] := Vf_saida[3]
  ENDIF

```

```

IF abs(Vf_saida[4])>10 THEN
  Vg_saida[4] := 10 * sign(Vf_saida[4])
ELSE
  Vg_saida[4] := Vf_saida[4]
ENDIF
IF abs(Vf_saida[5])>10 THEN
  Vg_saida[5] := 10 * sign(Vf_saida[5])
ELSE
  Vg_saida[5] := Vf_saida[5]
ENDIF
IF abs(Vf_saida[6])>10 THEN
  Vg_saida[6] := 10 * sign(Vf_saida[6])
ELSE
  Vg_saida[6] := Vf_saida[6]
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL

```

A.5 *Sampler/Holder*

Algoritmo 27: Código da MODELS *Sampler/Holder*

```

MODEL SAMHOL
INPUT
  Vg_saida[1..6]
OUTPUT
  X[1..6]
VAR
  X[1..6]
TIMESTEP MIN: 1.0416666667e-3
INIT
  X[1..6] := 0
ENDINIT
EXEC
  X[1] := Vg_saida[1]
  X[2] := Vg_saida[2]
  X[3] := Vg_saida[3]
  X[4] := Vg_saida[4]
  X[5] := Vg_saida[5]
  X[6] := Vg_saida[6]
ENDEXEC
ENDMODEL

```

A.6 *Conversor Analógico/Digital*

Algoritmo 28: Código da MODELS *Conversor Analógico/Digital*

```

MODEL CONVAD
INPUT
  X[1..6]

```

```

OUTPUT
  PF[1..6]
VAR
  PF[1..6]
  Z10
  RES
TIMESTEP MIN: 1.0416666667e-3
CONST
  Y{val:10}
  b{val:16}
INIT
  PF[1..6] := 0
  Z10 := 0
  RES := Y / ((2**(b - 1)) - 1)
ENDINIT
EXEC
  IF X[1]>=0 THEN
    Z10 := round(X[1] / RES)
    PF[1] := Z10 * RES
  ELSE
    Z10 := round(((2 * Y - abs(X[1])) * (2**(b - 1))) / Y)
    PF[1] := (Z10 - 2**b) * RES
  ENDIF
  IF X[2]>=0 THEN
    Z10 := round(X[2] / RES)
    PF[2] := Z10 * RES
  ELSE
    Z10 := round(((2 * Y - abs(X[2])) * (2**(b - 1))) / Y)
    PF[2] := (Z10 - 2**b) * RES
  ENDIF
  IF X[3]>=0 THEN
    Z10 := round(X[3] / RES)
    PF[3] := Z10 * RES
  ELSE
    Z10 := round(((2 * Y - abs(X[3])) * (2**(b - 1))) / Y)
    PF[3] := (Z10 - 2**b) * RES
  ENDIF
  IF X[4]>=0 THEN
    Z10 := round(X[4] / RES)
    PF[4] := Z10 * RES
  ELSE
    Z10 := round(((2 * Y - abs(X[4])) * (2**(b - 1))) / Y)
    PF[4] := (Z10 - 2**b) * RES
  ENDIF
  IF X[5]>=0 THEN
    Z10 := round(X[5] / RES)
    PF[5] := Z10 * RES
  ELSE
    Z10 := round(((2 * Y - abs(X[5])) * (2**(b - 1))) / Y)
    PF[5] := (Z10 - 2**b) * RES
  ENDIF

```

```

    IF X[6]>=0 THEN
        Z10 := round(X[6] / RES)
        PF[6] := Z10 * RES
    ELSE
        Z10 := round(((2 * Y - abs(X[6])) * (2**(b - 1))) / Y)
        PF[6] := (Z10 - 2**b) * RES
    ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL

```

A.7 Buffer

Algoritmo 29: Código da MODELS *Buffer*

```

MODEL BUFFER
INPUT
    PF[1..6]
OUTPUT
    Vb_saida1[1..17]
    Vb_saida2[1..17]
    Vb_saida3[1..17]
    Vb_saida4[1..17]
    Vb_saida5[1..17]
    Vb_saida6[1..17]
VAR
    Vb_saida1[1..17]
    Vb_saida2[1..17]
    Vb_saida3[1..17]
    Vb_saida4[1..17]
    Vb_saida5[1..17]
    Vb_saida6[1..17]
TIMESTEP MIN: 1.0416666667e-3
INIT
    Vb_saida1[1..17] := 0
    Vb_saida2[1..17] := 0
    Vb_saida3[1..17] := 0
    Vb_saida4[1..17] := 0
    Vb_saida5[1..17] := 0
    Vb_saida6[1..17] := 0
ENDINIT
EXEC
    FOR i:=2 TO 17 DO
        Vb_saida1[i-1] := Vb_saida1[i]
        Vb_saida2[i-1] := Vb_saida2[i]

```

```

        Vb_saida3[i-1] := Vb_saida3[i]
        Vb_saida4[i-1] := Vb_saida4[i]
        Vb_saida5[i-1] := Vb_saida5[i]
        Vb_saida6[i-1] := Vb_saida6[i]
    ENDFOR
    Vb_saida1[17] := PF[1]
    Vb_saida2[17] := PF[2]
    Vb_saida3[17] := PF[3]
    Vb_saida4[17] := PF[4]
    Vb_saida5[17] := PF[5]
    Vb_saida6[17] := PF[6]
ENDEXEC
ENDMODEL

```

A.8 Estimador de Fasor

Algoritmo 30: Código da MODELS Estimador de Fasor

```
MODEL ESTFAS
```

```
INPUT
```

```
    Vb_saida1[1..17]
```

```
    Vb_saida2[1..17]
```

```
    Vb_saida3[1..17]
```

```
    Vb_saida4[1..17]
```

```
    Vb_saida5[1..17]
```

```
    Vb_saida6[1..17]
```

```
    R_sec[1..2]
```

```
OUTPUT
```

```
    IVfund[1..12]
```

```
VAR
```

```
    IVfund[1..12]
```

```
    Ire1
```

```
    Iim1
```

```
    Ire2
```

```
    Iim2
```

```
    Ire3
```

```
    Iim3
```

```
    Vre1
```

```
    Vim1
```

```
    Vre2
```

```
    Vim2
```

```
    Vre3
```

```
    Vim3
```

```
    C1
```

```
    C2
```

```

RTEF
TIMESTEP MIN: 1.0416666667e-3
CONST
  N{val:16}
  delta{val:2 * pi / N}
INIT
  IVfund[1..12] := 0
  Ire1 := 0
  Iim1 := 0
  Ire2 := 0
  Iim2 := 0
  Ire3 := 0
  Iim3 := 0
  Vre1 := 0
  Vim1 := 0
  Vre2 := 0
  Vim2 := 0
  Vre3 := 0
  Vim3 := 0
  C1 := 0
  C2 := 0
  RTEF := 0
ENDINIT
EXEC
  RTEF := 1 / R_sec[1]
  C1 := 0
  C2 := 0
  FOR k:=1 TO N DO
    C1 := C1 + (sqrt(2) / N) * Vb_saida1[k] * cos((k - 1) * delta)
    C2 := C2 + (sqrt(2) / N) * Vb_saida1[k + 1] * cos((k - 1) * delta)
  ENDFOR
  Ire1 := RTEF * C1
  Iim1 := RTEF * (C1 * cos(delta) - C2) / sin(delta)
  IVfund[1] := norm(Ire1,Iim1)
  IF Ire1=0 THEN
    IVfund[2] := 0
  ELSE
    IVfund[2] := deg(atan2(Iim1,Ire1) + delta)
  ENDIF
  C1 := 0
  C2 := 0
  FOR k:=1 TO N DO
    C1 := C1 + (sqrt(2) / N) * Vb_saida2[k] * cos((k - 1) * delta)
    C2 := C2 + (sqrt(2) / N) * Vb_saida2[k + 1] * cos((k - 1) * delta)
  ENDFOR
  Ire2 := RTEF * C1
  Iim2 := RTEF * (C1 * cos(delta) - C2) / sin(delta)
  IVfund[3] := norm(Ire2,Iim2)
  IF Ire2=0 THEN
    IVfund[4] := 0
  ELSE
    IVfund[4] := deg(atan2(Iim2,Ire2) + delta)

```

```

ENDIF
C1 := 0
C2 := 0
FOR k:=1 TO N DO
    C1 := C1 + (sqrt(2) / N) * Vb_saida3[k] * cos((k - 1) * delta)
    C2 := C2 + (sqrt(2) / N) * Vb_saida3[k + 1] * cos((k - 1) * delta)
ENDFOR
Ire3 := RTEF * C1
Iim3 := RTEF * (C1 * cos(delta) - C2) / sin(delta)
IVfund[5] := norm(Ire3,Iim3)
IF Ire3=0 THEN
    IVfund[6] := 0
ELSE
    IVfund[6] := deg(atan2(Iim3,Ire3) + delta)
ENDIF
RTEF := 1 / R_sec[2]
C1 := 0
C2 := 0
FOR k:=1 TO N DO
    C1 := C1 + (sqrt(2) / N) * Vb_saida4[k] * cos((k - 1) * delta)
    C2 := C2 + (sqrt(2) / N) * Vb_saida4[k + 1] * cos((k - 1) * delta)
ENDFOR
Vre1 := RTEF * C1
Vim1 := RTEF * (C1 * cos(delta) - C2) / sin(delta)
IVfund[7] := norm(Vre1,Vim1)
IF Vre1=0 THEN
    IVfund[8] := 0
ELSE
    IVfund[8] := deg(atan2(Vim1,Vre1) + delta)
ENDIF
C1 := 0
C2 := 0
FOR k:=1 TO N DO
    C1 := C1 + (sqrt(2) / N) * Vb_saida5[k] * cos((k - 1) * delta)
    C2 := C2 + (sqrt(2) / N) * Vb_saida5[k + 1] * cos((k - 1) * delta)
ENDFOR
Vre2 := RTEF * C1
Vim2 := RTEF * (C1 * cos(delta) - C2) / sin(delta)
IVfund[9] := norm(Vre2,Vim2)
IF Vre2=0 THEN
    IVfund[10] := 0
ELSE
    IVfund[10] := deg(atan2(Vim2,Vre2) + delta)
ENDIF
C1 := 0
C2 := 0
FOR k:=1 TO N DO
    C1 := C1 + (sqrt(2) / N) * Vb_saida6[k] * cos((k - 1) * delta)
    C2 := C2 + (sqrt(2) / N) * Vb_saida6[k + 1] * cos((k - 1) * delta)
ENDFOR
Vre3 := RTEF * C1
Vim3 := RTEF * (C1 * cos(delta) - C2) / sin(delta)

```

```

IVfund[11] := norm(Vre3,Vim3)
IF Vre3=0 THEN
    IVfund[12] := 0
ELSE
    IVfund[12] := deg(atan2(Vim3,Vre3) + delta)
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL

```

A.9 Lógica de Atuação / Direcionalidade / *Trip* / Teleproteção

Algoritmo 31: Código da MODELS Lógica de Atuação / Direcionalidade / *Trip* / Teleproteção

```

MODEL RELEDT
INPUT
    IVfund[1..12]
    ENTRADA1
    ENTRADA2
OUTPUT
    TRIP
    SAIDA1
    SAIDA2
DATA
    CONEX
    ANGCON
    K1
    K2
    K3
    MT
    ITC
    T_INIC
VAR
    TEMP[1..3]
    IRMS[1..3]
    VARI[1..3]
    AUXI2[1..3]
    j
    PERTI[1..5]
    k
    PERTV[1..2]
    PR1
    PR2
    PR3

```

PR4
PR5
PR6
PR7
PR8
PR9
PR10
PMR1[1..500]
PMR2[1..500]
PMR3[1..500]
PMR4[1..500]
PMR5[1..500]
PMR6[1..500]
PMR7[1..500]
PMR8[1..500]
PMR9[1..500]
PMR10[1..500]
AG[1..500]
AG2[1..500]
AG3[1..500]
SOAGPx
SOAG
AGPx
PICKUP[1..3]
AUXI[1..3]
I_r
t_a
TEM
TE[1..3]
ACIONAR
AUX[1..6]
AUX2[1..6]
VER
VER2
ANGLEI[1..3]
ANGLEV[1..3]
omega
tempo
Vang[1..3]
Iang[1..3]
M[1..3]
alfa[1..3]
VMmod[1..3]
VMang[1..3]
rea[1..3]
imag[1..3]
Vagpo[1..3]
COmax[1..3]
ANGat[1..3]
contador
ATUA[1..3]
TRIP

```
IRMS[1..3] := 0
```

```
VARI[1..3] := 0
AUXI2[1..3] := 0
j := 0
PERTI[1..5] := 0
k := 0
PERTV[1..2] := 0
PR1 := 0
PR2 := 0
PR3 := 0
PR4 := 0
PR5 := 0
PR6 := 0
PR7 := 0
PR8 := 0
PR9 := 0
PR10 := 0
PMR1[1..500] := 0
PMR2[1..500] := 0
PMR3[1..500] := 0
PMR4[1..500] := 0
PMR5[1..500] := 0
PMR6[1..500] := 0
PMR7[1..500] := 0
PMR8[1..500] := 0
PMR9[1..500] := 0
PMR10[1..500] := 0
AG[1..500] := 0
AG2[1..500] := 0
AG3[1..500] := 0
SOAGPx := 0
SOAG := 0
AGPx := 0
PICKUP[1..3] := 1
AUXI[1..3] := 0
I_r:= 0
t_a := 0
TEM := 0
TE[1..3] := 0
ACIONAR := 0
AUX[1..6] := 0
AUX2[1..6] := 0
VER := 0
VER2 := 0
ANGLEI[1..3] := 0
ANGLEV[1..3] := 0
omega := 0
tempo := -timestep
Vang[1..3] := 0
Iang[1..3] := 0
M[1..3] := 0
alfa[1..3] := 0
```

```

VMmod[1..3] := 0
VMang[1..3] := 0
rea[1..3] := 0
imag[1..3] := 0
Vagpo[1..3] := 0
COMax[1..3] := 0
ANGat[1..3] := 0
contador := 0
ATUA[1..3] := 0
TRIP := 0
SAIDA1 := 0
SAIDA2 := 0
cont := -timestep
ENDINIT
EXEC
VARI[1] := abs(IVfund[1] - IRMS[1])
IF t>=TEMP[1] THEN
    TEMP[1] := t + 0.016666667
    IRMS[1] := IVfund[1]
ENDIF
IF AUXI2[1]=0 THEN
    j := round((NPONTO - 1) / (X) * (IRMS[1])) + 1
    IF j>NPONTO THEN
        j := NPONTO
    ENDIF
    PERTI[1] := IMB[j]
    PERTI[2] := IB[j]
    PERTI[3] := IM[j]
    PERTI[4] := IA[j]
    PERTI[5] := IMA[j]
    k := round((NPONTO - 1) / (X) * (VARI[1])) + 1
    IF k>NPONTO THEN
        k := NPONTO
    ENDIF
    PERTV[1] := VP[k]
    PERTV[2] := VA[k]
    PR1 := min(PERTI[1],PERTV[1])
    PR2 := min(PERTI[2],PERTV[1])
    PR3 := min(PERTI[3],PERTV[1])
    PR4 := min(PERTI[4],PERTV[1])
    PR5 := min(PERTI[5],PERTV[1])
    PR6 := min(PERTI[1],PERTV[2])
    PR7 := min(PERTI[2],PERTV[2])
    PR8 := min(PERTI[3],PERTV[2])
    PR9 := min(PERTI[4],PERTV[2])
    PR10 := min(PERTI[5],PERTV[2])
    FOR q:=1 TO NPONTO DO
        PMR1[q] := min(PR1,PB[q])
        PMR2[q] := min(PR2,PM[q])
        PMR3[q] := min(PR3,PA[q])
        PMR4[q] := min(PR4,PMA[q])

```

```

    PMR5[q] := min(PR5,PEA[q])
    PMR6[q] := min(PR6,PMB[q])
    PMR7[q] := min(PR7,PB[q])
    PMR8[q] := min(PR8,PM[q])
    PMR9[q] := min(PR9,PA[q])
    PMR10[q] := min(PR10,PMA[q])
  ENDFOR
  FOR q:=1 TO NPONTO DO
    AG[q] := max(max(max(max(PMR1[q],PMR2[q]),PMR3[q]),PMR4[q]),PMR5[q])
    AG2[q] := max(max(max(max(PMR6[q],PMR7[q]),PMR8[q]),PMR9[q]),PMR10[q])
    AG3[q] := max(AG[q],AG2[q])
  ENDFOR
  SOAGPx := 0
  SOAG := 0
  FOR q:=1 TO NPONTO DO
    AGPx := AG3[q] * Px[q]
    SOAGPx := SOAGPx + AGPx
    SOAG := SOAG + AG3[q]
  ENDFOR
  PICKUP[1] := SOAGPx / SOAG
ENDIF
VARI[2] := abs(IVfund[3] - IRMS[2])
IF t>=TEMP[2] THEN
  TEMP[2] := t + 0.016666667
  IRMS[2] := IVfund[3]
ENDIF
IF AUXI2[2]=0 THEN
  j := round((NPONTO - 1) / (X) * (IRMS[2])) + 1
  IF j>NPONTO THEN
    j := NPONTO
  ENDIF
  PERTI[1] := IMB[j]
  PERTI[2] := IB[j]
  PERTI[3] := IM[j]
  PERTI[4] := IA[j]
  PERTI[5] := IMA[j]
  k := round((NPONTO - 1) / (X) * (VARI[2])) + 1
  IF k>NPONTO THEN
    k := NPONTO
  ENDIF
  PERTV[1] := VP[k]
  PERTV[2] := VA[k]
  PR1 := min(PERTI[1],PERTV[1])
  PR2 := min(PERTI[2],PERTV[1])
  PR3 := min(PERTI[3],PERTV[1])
  PR4 := min(PERTI[4],PERTV[1])
  PR5 := min(PERTI[5],PERTV[1])
  PR6 := min(PERTI[1],PERTV[2])
  PR7 := min(PERTI[2],PERTV[2])
  PR8 := min(PERTI[3],PERTV[2])
  PR9 := min(PERTI[4],PERTV[2])

```

```

PR10 := min(PERTI[5],PERTV[2])
FOR q:=1 TO NPONTO DO
  PMR1[q] := min(PR1,PB[q])
  PMR2[q] := min(PR2,PM[q])
  PMR3[q] := min(PR3,PA[q])
  PMR4[q] := min(PR4,PMA[q])
  PMR5[q] := min(PR5,PEA[q])
  PMR6[q] := min(PR6,PMB[q])
  PMR7[q] := min(PR7,PB[q])
  PMR8[q] := min(PR8,PM[q])
  PMR9[q] := min(PR9,PA[q])
  PMR10[q]:=min(PR10,PMA[q])
ENDFOR
FOR q:=1 TO NPONTO DO
  AG[q] := max(max(max(max(PMR1[q],PMR2[q]),PMR3[q]),PMR4[q]),PMR5[q])
  AG2[q] := max(max(max(max(PMR6[q],PMR7[q]),PMR8[q]),PMR9[q]),PMR10[q])
  AG3[q]:=max(AG[q],AG2[q])
ENDFOR
SOAGPx := 0
SOAG := 0
FOR q:=1 TO NPONTO DO
  AGPx := AG3[q] * Px[q]
  SOAGPx := SOAGPx + AGPx
  SOAG := SOAG + AG3[q]
ENDFOR
PICKUP[2] := SOAGPx / SOAG
ENDIF
VARI[3] := abs(IVfund[5] - IRMS[3])
IF t>=TEMP[3] THEN
  TEMP[3] := t + 0.016666667
  IRMS[3] := IVfund[5]
ENDIF
IF AUXI2[3]=0 THEN
  j := round((NPONTO - 1) / (X) * (IRMS[3])) + 1
  IF j>NPONTO THEN
    j := NPONTO
  ENDIF
  PERTI[1] := IMB[j]
  PERTI[2] := IB[j]
  PERTI[3] := IM[j]
  PERTI[4] := IA[j]
  PERTI[5] := IMA[j]
  k := round((NPONTO - 1) / (X) * (VARI[3])) + 1
  IF k>NPONTO THEN
    k := NPONTO
  ENDIF
  PERTV[1] := VP[k]
  PERTV[2] := VA[k]
  PR1 := min(PERTI[1],PERTV[1])
  PR2 := min(PERTI[2],PERTV[1])
  PR3 := min(PERTI[3],PERTV[1])

```

```

PR4 := min(PERTI[4],PERTV[1])
PR5 := min(PERTI[5],PERTV[1])
PR6 := min(PERTI[1],PERTV[2])
PR7 := min(PERTI[2],PERTV[2])
PR8 := min(PERTI[3],PERTV[2])
PR9 := min(PERTI[4],PERTV[2])
PR10 := min(PERTI[5],PERTV[2])
FOR q:=1 TO NPONTO DO
  PMR1[q] := min(PR1,PB[q])
  PMR2[q] := min(PR2,PM[q])
  PMR3[q] := min(PR3,PA[q])
  PMR4[q] := min(PR4,PMA[q])
  PMR5[q] := min(PR5,PEA[q])
  PMR6[q] := min(PR6,PMB[q])
  PMR7[q] := min(PR7,PB[q])
  PMR8[q] := min(PR8,PM[q])
  PMR9[q] := min(PR9,PA[q])
  PMR10[q] := min(PR10,PMA[q])
ENDFOR
FOR q:=1 TO NPONTO DO
  AG[q] := max(max(max(max(PMR1[q],PMR2[q]),PMR3[q]),PMR4[q]),PMR5[q])
  AG2[q] := max(max(max(max(PMR6[q],PMR7[q]),PMR8[q]),PMR9[q]),PMR10[q])
  AG3[q] := max(AG[q],AG2[q])
ENDFOR
SOAGPx := 0
SOAG := 0
FOR q:=1 TO NPONTO DO
  AGPx := AG3[q] * Px[q]
  SOAGPx := SOAGPx + AGPx
  SOAG := SOAG + AG3[q]
ENDFOR
PICKUP[3] := SOAGPx / SOAG
ENDIF
IF t>=T_INIC THEN
  IF IVfund[1]>=PICKUP[1] THEN
    AUXI[1] := 1
    AUXI2[1] := 1
  ENDIF
  IF AUXI[1]=1 THEN
    I_r := IVfund[1] / PICKUP[1]
    t_a := ((K1 * MT) / (I_r**K2 - K3))
    TEM := timestep * (1 / t_a)
    TE[1] := TE[1] + TEM
    IF TE[1]>=1 THEN
      ACIONAR := 1
    ENDIF
  ENDIF
ENDIF
IF IVfund[3]>=PICKUP[2] THEN
  AUXI[2] := 1
  AUXI2[2] := 1
ENDIF

```

```

IF AUXI[2]=1 THEN
  I_r := IVfund[3] / PICKUP[2]
  t_a := ((K1 * MT) / (I_r**K2 - K3))
  TEM := timestep * (1 / t_a)
  TE[2] := TE[2] + TEM
  IF TE[2]>=1 THEN
    ACIONAR := 1
  ENDIF
ENDIF
IF IVfund[5]>=PICKUP[3] THEN
  AUXI[3] := 1
  AUXI2[3] := 1
ENDIF
IF AUXI[3]=1 THEN
  I_r := IVfund[5] / PICKUP[3]
  t_a := ((K1 * MT) / (I_r**K2 - K3))
  TEM := timestep * (1 / t_a)
  TE[3] := TE[3] + TEM
  IF TE[3]>=1 THEN
    ACIONAR := 1
  ENDIF
ENDIF
IF ABS(AUX[1] - IVfund[2])<25 OR AUX2[1]=1 THEN
  AUX[1] := IVfund[2]
  AUX2[1] := 1
ENDIF
IF ABS(AUX[2] - IVfund[4])<25 OR AUX2[2]=1 THEN
  AUX[2] := IVfund[4]
  AUX2[2] := 1
ENDIF
IF ABS(AUX[3] - IVfund[6])<25 OR AUX2[3]=1 THEN
  AUX[3] := IVfund[6]
  AUX2[3] := 1
ENDIF
IF ABS(AUX[4] - IVfund[8])<25 OR AUX2[4]=1 THEN
  AUX[4] := IVfund[8]
  AUX2[4] := 1
ENDIF
IF ABS(AUX[5] - IVfund[10])<25 OR AUX2[5]=1 THEN
  AUX[5] := IVfund[10]
  AUX2[5] := 1
ENDIF
IF ABS(AUX[6] - IVfund[12])<25 OR AUX2[6]=1 THEN
  AUX[6] := IVfund[12]
  AUX2[6] := 1
ENDIF
IF AUX2[1]=1 THEN
  WHILE (AUX[1] - ANGLEI[1])<=-30 DO
    AUX[1] := AUX[1] + 180
  ENDWHILE
  WHILE (AUX[1] - ANGLEI[1])>=150 DO

```

```
AUX[1] := AUX[1] - 180
ENDWHILE
VER := AUX[1] - IVfund[2]
VER2 := trunc(VER / 360)
IF VER=0 or VER=(VER2 * 360) THEN
    ANGLEI[1] := AUX[1]
ELSE
    ANGLEI[1] := AUX[1] - 180
ENDIF
ENDIF
IF AUX2[2]=1 THEN
    WHILE (AUX[2] - ANGLEI[2])<=-30 DO
        AUX[2] := AUX[2] + 180
    ENDWHILE
    WHILE (AUX[2] - ANGLEI[2])>=150 DO
        AUX[2] := AUX[2] - 180
    ENDWHILE
    VER := AUX[2] - IVfund[4]
    VER2 := trunc(VER / 360)
    IF VER=0 or VER=(VER2 * 360) THEN
        ANGLEI[2] := AUX[2]
    ELSE
        ANGLEI[2] := AUX[2] - 180
    ENDIF
ENDIF
IF AUX2[3]=1 THEN
    WHILE (AUX[3] - ANGLEI[3])<=-30 DO
        AUX[3] := AUX[3] + 180
    ENDWHILE
    WHILE (AUX[3] - ANGLEI[3])>=150 DO
        AUX[3] := AUX[3] - 180
    ENDWHILE
    VER := AUX[3] - IVfund[6]
    VER2 := trunc(VER / 360)
    IF VER=0 or VER=(VER2 * 360) THEN
        ANGLEI[3] := AUX[3]
    ELSE
        ANGLEI[3] := AUX[3] - 180
    ENDIF
ENDIF
IF AUX2[4]=1 THEN
    WHILE (AUX[4] - ANGLEV[1])<=-30 DO
        AUX[4] := AUX[4] + 180
    ENDWHILE
    WHILE (AUX[4] - ANGLEV[1])>=150 DO
        AUX[4] := AUX[4] - 180
    ENDWHILE
    VER := AUX[4] - IVfund[8]
    VER2 := trunc(VER / 360)
    IF VER=0 or VER=(VER2 * 360) THEN
        ANGLEV[1] := AUX[4]
```

```

ELSE
    ANGLEV[1] := AUX[4] - 180
ENDIF
ENDIF
IF AUX2[5]=1 THEN
    WHILE (AUX[5] - ANGLEV[2])<=-30 DO
        AUX[5] := AUX[5] + 180
    ENDWHILE
    WHILE (AUX[5] - ANGLEV[2])>=150 DO
        AUX[5] := AUX[5] - 180
    ENDWHILE
    VER := AUX[5] - IVfund[10]
    VER2 := trunc(VER / 360)
    IF VER=0 or VER=(VER2 * 360) THEN
        ANGLEV[2] := AUX[5]
    ELSE
        ANGLEV[2] := AUX[5] - 180
    ENDIF
ENDIF
IF AUX2[6]=1 THEN
    WHILE (AUX[6] - ANGLEV[3])<=-30 DO
        AUX[6] := AUX[6] + 180
    ENDWHILE
    WHILE (AUX[6] - ANGLEV[3])>=150 DO
        AUX[6] := AUX[6] - 180
    ENDWHILE
    VER := AUX[6] - IVfund[12]
    VER2 := trunc(VER / 360)
    IF VER=0 or VER=(VER2 * 360) THEN
        ANGLEV[3] := AUX[6]
    ELSE
        ANGLEV[3] := AUX[6] - 180
    ENDIF
ENDIF
IF omega>10800 THEN
    ANGLEI[1] := ANGLEI[1] - 10800
    ANGLEI[2] := ANGLEI[2] - 10800
    ANGLEI[3] := ANGLEI[3] - 10800
    ANGLEV[1] := ANGLEV[1] - 10800
    ANGLEV[2] := ANGLEV[2] - 10800
    ANGLEV[3] := ANGLEV[3] - 10800
    tempo := tempo - 0.5
ENDIF
tempo := tempo + timestep
omega := deg(120 * pi * tempo)
Vang[1] := ANGLEV[1] - omega
Vang[2] := ANGLEV[2] - omega
Vang[3] := ANGLEV[3] - omega
Iang[1] := ANGLEI[1] - omega
Iang[2] := ANGLEI[2] - omega
Iang[3] := ANGLEI[3] - omega

```

```

IF t>0.2 THEN
  M[1..3] := 5
  IF IVfund[7]<=55 THEN
    M[1] := 100
  ENDIF
  IF IVfund[9]<=55 THEN
    M[2] := 100
  ENDIF
  IF IVfund[11]<=55 THEN
    M[3] := 100
  ENDIF
ELSE
  M[1..3]:=0.1
ENDIF
alfa[1] := 1 / (M[1] * N + 1)
alfa[2] := 1 / (M[2] * N + 1)
alfa[3] := 1 / (M[3] * N + 1)
VMmod[1] := alfa[1] * IVfund[7] + (1 - alfa[1]) * VMmod[1]
VMmod[2] := alfa[2] * IVfund[9] + (1 - alfa[2]) * VMmod[2]
VMmod[3] := alfa[3] * IVfund[11] + (1 - alfa[3]) * VMmod[3]
VMang[1] := alfa[1] * Vang[1] + (1 - alfa[1]) * VMang[1]
VMang[2] := alfa[2] * Vang[2] + (1 - alfa[2]) * VMang[2]
VMang[3] := alfa[3] * Vang[3] + (1 - alfa[3]) * VMang[3]
rea[1] := cos(rad(VMang[1])) * VMmod[1]
imag[1] := sin(rad(VMang[1])) * VMmod[1]
rea[2] := cos(rad(VMang[2])) * VMmod[2]
imag[2] := sin(rad(VMang[2])) * VMmod[2]
rea[3] := cos(rad(VMang[3])) * VMmod[3]
imag[3] := sin(rad(VMang[3])) * VMmod[3]
IF CONEX=90 THEN
  Vagpo[1] := deg(atan2((imag[2] - imag[3]),(rea[2] - rea[3])))
  Vagpo[2] := deg(atan2((imag[3] - imag[1]),(rea[3] - rea[1])))
  Vagpo[3] := deg(atan2((imag[1] - imag[2]),(rea[1] - rea[2])))
ENDIF
IF CONEX=60 THEN
  Vagpo[1] := deg(atan2((imag[2] - imag[3] + imag[1] - imag[3]),(rea[2] - rea[3] + rea[1] - rea[3])))
  Vagpo[2] := deg(atan2((imag[3] - imag[1] + imag[2] - imag[1]),(rea[3] - rea[1] + rea[2] - rea[1])))
  Vagpo[3] := deg(atan2((imag[1] - imag[2] + imag[3] - imag[2]),(rea[1] - rea[2] + rea[3] - rea[2])))
ENDIF
IF CONEX=30 THEN
  Vagpo[1] := deg(atan2((imag[1] - imag[3]),(rea[1] - rea[3])))
  Vagpo[2] := deg(atan2((imag[2] - imag[1]),(rea[2] - rea[1])))
  Vagpo[3] := deg(atan2((imag[3] - imag[2]),(rea[3] - rea[2])))
ENDIF
FOR x:=1 TO 3 DO
  Cmax[x] := Vagpo[x] + ANGCON
  WHILE Iang[x]>180 DO
    Iang[x] := Iang[x] - 360
  
```

```

ENDWHILE
WHILE Iang[x]<-180 DO
    Iang[x] := Iang[x] + 360
ENDWHILE
WHILE CMax[x]>180 DO
    CMax[x] := CMax[x] - 360
ENDWHILE
WHILE CMax[x]<-180 DO
    CMax[x] := CMax[x] + 360
ENDWHILE
ANGat[x] := CMax[x] - Iang[x]
WHILE ANGat[x]>180 DO
    ANGat[x] := ANGat[x] - 360
ENDWHILE
WHILE ANGat[x]<-180 DO
    ANGat[x] := ANGat[x] + 360
ENDWHILE
IF (AUXI[1]=1 or AUXI[2]=1 or AUXI[3]=1) and (contador<=0.1) THEN
    contador := contador + timestep
    IF ANGat[x]<90 and ANGat[x]>-90 and AUXI[x]=1 THEN
        ATUA[x] := 1
    ELSE
        ATUA[x] := 0
    ENDIF
ENDIF
ENDFOR
IF (ACIONAR=1 and (IVfund[1]>=PICKUP[1] or IVfund[3]>=PICKUP[2] or
IVfund[5]>=PICKUP[3]) and (ATUA[1]=1 or ATUA[2]=1 or ATUA[3]=1) and ENTRADA2=0)
THEN
    TRIP := 1
ENDIF
IF (ENTRADA1=1 or ENTRADA2=1) and (IVfund[1]>=PICKUP[1] or
IVfund[3]>=PICKUP[2] or IVfund[5]>=PICKUP[3]) THEN
    TRIP := 1
ENDIF
IF TRIP=1 THEN
    SAIDA1 := 1
    SAIDA2 := -1
    cont := cont + timestep
    IF cont>=ITC THEN
        IF (IVfund[1]>=PICKUP[1] or IVfund[3]>=PICKUP[2] or IVfund[5]>=PICKUP[3])
THEN
            SAIDA2 := 1
        ELSE
            SAIDA2 := 0
        ENDIF
    ENDIF
ELSE
    SAIDA1 := 0
    SAIDA2 := 0
ENDIF

```

```

ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL

```

A.10 Período Zero da Corrente

Algoritmo 32: Código da MODELS Período Zero da Corrente

```

MODEL zero
  INPUT
    TRIP
    I[1..3]
  OUTPUT
    TRIPA
    TRIPB
    TRIPC
  VAR
    TRIPA
    TRIPB
    TRIPC
    cont
    sigI[1..3]
    auxsigI[1..3]
  INIT
    TRIPA := 1
    TRIPB := 1
    TRIPC := 1
    cont := 0
    sigI[1..3] := 0
    auxsigI[1..3] := 0
  ENDINIT
  EXEC
    auxsigI[1] := SIGN(I[1])
    auxsigI[2] := SIGN(I[2])
    auxsigI[3] := SIGN(I[3])
    IF TRIP=1 THEN
      IF cont=0 THEN
        cont := cont + 1
        sigI[1] := SIGN(I[1])
        sigI[2] := SIGN(I[2])
        sigI[3] := SIGN(I[3])
      ENDIF
      IF sigI[1]<>auxsigI[1] THEN

```

```
        TRIPA := 0
    ENDIF
    IF sigI[2]<>auxsigI[2] THEN
        TRIPB := 0
    ENDIF
    IF sigI[3]<>auxsigI[3] THEN
        TRIPC := 0
    ENDIF
ENDIF
ENDEXEC
ENDMODEL
```

.