



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

Rodrigo César Dantas de Lima

**Um Sistema de Proteção de Sobrecorrente Direcional Adaptativa
Baseada em Lógica *Fuzzy* para Sistemas de Distribuição de Energia
Elétrica com Geração Distribuída Fotovoltaica**

Campina Grande – PB

Abril de 2025

Rodrigo César Dantas de Lima

**Um Sistema de Proteção de Sobrecorrente Direcional Adaptativa
Baseada em Lógica *Fuzzy* para Sistemas de Distribuição de Energia
Elétrica com Geração Distribuída Fotovoltaica**

Tese de Doutorado apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para a obtenção do grau de Doutor em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Energia

Núbia Silva Dantas Brito, Dra.

Orientadora

Felipe Vigolvino Lopes, Dr.

Co-Orientador

Campina Grande – PB

Abril de 2025

L732s

Lima, Rodrigo César Dantas de.

Um sistema de proteção de sobrecorrente direcional adaptativa baseada em lógica *fuzzy* para sistemas de distribuição de energia elétrica com geração distribuída fotovoltaica / Rodrigo César Dantas de Lima. – Campina Grande, 2025.

125 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2025.

"Orientação: Profa. Dra. Nubia Silva Dantas Brito, Prof. Dr. Felipe Vigolvinho Lopes".

Referências.

1. Geração Distribuída. 2. Lógica *Fuzzy*. 3. Proteção Direcional de Sobrecorrente. 4. Sistema de Distribuição de Energia Elétrica. 5. Sistema de Proteção Adaptativa. I. Brito, Nubia Silva Dantas. II. Lopes, Felipe Vigolvinho. III. Título.

CDU 621.3(043)

**Um Sistema de Proteção de Sobrecorrente Direcional Adaptativa
Baseada em Lógica Fuzzy para Sistemas de Distribuição de Energia
Elétrica com Geração Distribuída Fotovoltaica**

RODRIGO CÉSAR DANTAS DE LIMA

TESE APROVADA EM 28/02/2025

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

**FELIPE VIGOLVINO LOPES, D.Sc., UFPB
Orientador(a)**

**WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Dr., UFCG
Examinador(a)**

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

**MÁRIO OLESKOVICZ, Dr., USP
Examinador(a)**

**OURESTE ELIAS BATISTA, Dr., UFES
Examinador(a)**

CAMPINA GRANDE - PB



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA ELETRICA
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

1 - ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS, NO DOMÍNIO DA ENGENHARIA ELÉTRICA, REALIZADA EM 28 DE FEVEREIRO DE 2025
(Nº 394)

CANDIDATO(A): **RODRIGO CÉSAR DANTAS DE LIMA**. COMISSÃO EXAMINADORA: KARCIUS MARCELUS COLAÇO DANTAS, D.Sc., UFCG - Presidente da Comissão e Examinador Interno, NÚBIA SILVA DANTAS BRITO, D.Sc., UFCG – Orientadora, FELIPE VIGOLVINO LOPES, D.Sc., UFPB – Orientador, WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG - Examinador Interno, MÁRIO OLESKOVICZ, Dr., USP - Examinador Externo, OURESTE ELIAS BATISTA, Dr., UFES - Examinador Externo. TÍTULO DA TESE: Um Sistema de Proteção de Sobrecorrente Direcional Adaptativa Baseada em Lógica Fuzzy para Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica com Geração Distribuída Fotovoltaica. ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Processamento da Energia. HORA DE INÍCIO: **08h00** – LOCAL: **Sala Virtual, conforme Art. 5º da PORTARIA SEI Nº 01/PRPG/UFCG/GPR, DE 09 DE MAIO DE 2022**. Em sessão pública, após exposição de cerca de 45 minutos, o(a) candidato(a) foi arguido(a) oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização, no tema de sua tese, obtendo conceito APROVADO com modificações no texto, de acordo com as exigências da Comissão Examinadora, que deverão ser cumpridas no prazo de 30 dias. Face à aprovação, declara o presidente da Comissão, achar-se o examinado, legalmente habilitado a receber o Grau de Doutor em Ciências, no domínio da Engenharia Elétrica, cabendo a Universidade Federal de Campina Grande, como de direito, providenciar a expedição do Diploma, a que o(a) mesmo(a) faz jus. Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata, que é assinada por mim, Leandro Ferreira de Lima, e os membros da Comissão Examinadora. Campina Grande, 28 de Fevereiro de 2025.

LEANDRO FERREIRA DE LIMA

Secretário

KARCIUS MARCELUS COLAÇO DANTAS, D.Sc., UFCG
Presidente da Comissão e Examinador Interno

NÚBIA SILVA DANTAS BRITO, D.Sc., UFCG
Orientadora

FELIPE VIGOLVINO LOPES, D.Sc., UFPB
Orientador

WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG

Examinador Externo

MÁRIO OLESKOVICZ, Dr., USP
Examinador ExternoOURESTE ELIAS BATISTA, Dr., UFES
Examinador ExternoRODRIGO CÉSAR DANTAS DE LIMA
Candidato

2 - APROVAÇÃO

2.1. Segue a presente Ata de Defesa de Tese de Doutorado do candidato **RODRIGO CÉSAR DANTAS DE LIMA**, assinada eletronicamente pela Comissão Examinadora acima identificada.

2.2. No caso de examinadores externos que não possuam credenciamento de usuário externo ativo no SEI, para igual assinatura eletrônica, os examinadores internos signatários **certificam** que os examinadores externos acima identificados participaram da defesa da tese e tomaram conhecimento do teor deste documento.



Documento assinado eletronicamente por **LEANDRO FERREIRA DE LIMA, SECRETÁRIO (A)**, em 07/03/2025, às 13:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **NUBIA SILVA DANTAS BRITO, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/03/2025, às 14:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mário Oleskovicz, Usuário Externo**, em 08/03/2025, às 09:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **OURESTE ELIAS BATISTA, Usuário Externo**, em 08/03/2025, às 15:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **KARCIUS MARCELUS COLACO DANTAS, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/03/2025, às 11:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **WASHINGTON LUIZ ARAUJO NEVES, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 20/03/2025, às 09:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **RODRIGO CESAR DANTAS DE LIMA, Usuário Externo**, em 24/03/2025, às 21:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Felipe Vigolvino Lopes, Usuário Externo**, em 27/03/2025, às 22:05, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **5283898** e o código CRC **D39A632A**.

Referência: Processo nº 23096.011875/2025-87

SEI nº 5283898

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ser meu norte e refúgio nos momentos de maior dificuldade.

Agradeço aos meus pais, João e Gilmaísa, pelo esforço constante em proporcionar as melhores condições para mim, tanto nos estudos quanto no lazer.

À minha esposa Thayse, pelo incentivo, amor, paciência, apoio, compreensão e presença ao longo desses anos.

À minha irmã Priscila, meu cunhado Diego e meus sobrinhos Maria Luísa e Benício, que sempre torceram pelo meu sucesso.

Aos meus familiares e amigos de longa data, pelo apoio constante.

Aos meus orientadores professores Núbia e Felipe, pela confiança, oportunidade, dedicação e direcionamento durante a realização deste trabalho.

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

RESUMO

Nos últimos anos é crescente o aumento da geração de energia elétrica próxima aos consumidores, denominada geração distribuída. No Brasil, a tecnologia fotovoltaica representa mais de 99% das unidades consumidoras com geração distribuída instaladas. Apesar das reconhecidas vantagens, sabe-se que a inserção de novas fontes geradoras em um sistema de distribuição de energia elétrica, que foi projetado para operar de maneira unidirecional, pode proporcionar modificações no fluxo de potência e, conseqüentemente, provocar vários problemas, em particular ao sistema de proteção dos sistemas de distribuição de energia elétrica tradicionais. Esta Tese enquadra-se nesse contexto e propõe uma proteção de sobrecorrente direcional adaptativa para sistemas de distribuição de energia elétrica com geração distribuída do tipo fotovoltaica. A solução é baseada no conceito de lógica *fuzzy*, sendo capaz de ajustar o valor da corrente de *pickup* utilizada nas curvas digitais de operação em tempo inverso aplicadas tanto aos relés direcionais de sobrecorrente quanto aos religadores digitais de forma *online*. Usando uma arquitetura centralizada (modelada no ambiente Simulink/MATLAB[®]), a qual é caracterizada por conter um computador localizado na subestação que controla todo o sistema de proteção, o sistema proposto monitora e processa os canais analógicos e digitais do relés e religadores, obtendo como resultado a variação dos estados dos disjuntores e a potência ativa do sistema de distribuição, os quais são utilizados como indicativos de mudança de cenário de operação. Em caso de identificação de alteração de cenário, o sistema proposto recalcula a corrente de *pickup*, tendo como variáveis de entrada da lógica *fuzzy* a corrente de carga e a corrente de curto-circuito. Para validar a solução proposta, os sistemas-testes de 34 barras e 69 barras do IEEE foram simulados no *software* Simulink (MATLAB[®]), permitindo variar a potência nominal da geração distribuída, o carregamento do sistema de distribuição e o tipo de curto-circuito. Três cenários foram avaliados: i) localização da instalação dos geradores fotovoltaicos; ii) mudança de topologia e iii) variação no carregamento do alimentador. Os resultados obtidos confirmam os benefícios da solução proposta e corroboram que a realização de mudanças na proteção de sobrecorrente com inserção de geração distribuída pode ser fundamental para garantir a sensibilidade dos dispositivos e uma correta atuação visando garantir a coordenação da proteção direcional de sobrecorrente e garantindo a continuidade do serviço do sistema de distribuição.

Palavras-chave: geração distribuída, lógica *fuzzy*, proteção direcional de sobrecorrente, sistema de distribuição de energia elétrica, sistema de proteção adaptativa.

ABSTRACT

In recent years, there has been a growing increase in the generation of electricity close to consumers, known as distributed generation. In Brazil, photovoltaic technology accounts for more than 99% of consumer units with installed distributed generation. Despite the recognized advantages, it is known that the insertion of new generating sources into an electrical power distribution system, which was designed to operate unidirectionally, can lead to changes in power flow and, consequently, cause several problems, particularly to the protection system of traditional electrical power distribution systems. Therefore, this Thesis proposes an adaptive directional overcurrent protection for electrical power distribution systems with photovoltaic distributed generation. The solution is based on the concept of fuzzy logic, being able to adjust the pickup current value used in the digital inverse time operating curves applied to both directional overcurrent relays and digital reclosers online. Using a centralized architecture (modeled in the Simulink/MATLAB® environment), which is characterized by containing a computer located at the substation that controls the entire protection system, the proposed system monitors and processes the analog and digital channels of the relays and reclosers, resulting in the variation of circuit breaker states and the active power of the distribution system, which are used as indicators of changes in the operating scenario. If a scenario change is identified, the proposed system recalculates the pickup current, using the load current and short-circuit current as input variables for the fuzzy logic. To validate the proposed solution, the IEEE 34-bus and 69-bus test systems are simulated in Simulink (MATLAB®) software, allowing the nominal power of the distributed generation, the loading of the distribution system, and the type of short circuit to be varied. Three scenarios were evaluated: i) location of the installation of photovoltaic generators; ii) topology change; and iii) variation in feeder loading. The results obtained confirm the benefits of the proposed solution. Making changes to overcurrent protection with the insertion of distributed generation can be fundamental to ensure the sensitivity of the devices and correct operation to ensure the coordination of directional overcurrent protection and ensure the continuity of the distribution system service.

Keywords: adaptive protection system, directional overcurrent protection, distributed generation, electrical power distribution system, fuzzy logic.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema de proteção de um SDEE tradicional.	27
Figura 2 – Sistema-teste IEEE 34 barras.	34
Figura 3 – Coordenograma da proteção de sobrecorrente tradicional respeitando a técnica <i>fuse-fase</i>	34
Figura 4 – Modelo de uma célula fotovoltaica.	37
Figura 5 – Característica I-V.	37
Figura 6 – Topologia básica de sistemas fotovoltaicos contendo dois estágios de conversão.	39
Figura 7 – Aumento do nível de curto-circuito em função das contribuições da GD.	40
Figura 8 – Coordenograma da proteção de sobrecorrente tradicional com violação da técnica <i>fuse-save</i>	41
Figura 9 – Arquitetura típica de um sistema de PA.	43
Figura 10 – Função de pertinência: (a) Triangular (b) Trapezoidal.	46
Figura 11 – Estrutura básica de um sistema <i>fuzzy</i>	47
Figura 12 – Inferência <i>fuzzy</i>	48
Figura 13 – Arquitetura do SPA _{fuzzy}	66
Figura 14 – Fluxograma do SPA _{fuzzy}	66
Figura 15 – Monitoramento dos canais digitais.	67
Figura 16 – Monitoramento dos canais analógicos.	68
Figura 17 – Fluxograma do cálculo de curto-circuito.	70
Figura 18 – Sistema <i>fuzzy</i> proposto.	71
Figura 19 – Funções de pertinência triangulares de entrada: (a) Corrente de carga e (b) Corrente de curto-circuito.	72
Figura 20 – Funções de pertinência trapezoidais de saída: corrente de pickup.	72
Figura 21 – Comunicação da central de controle.	74
Figura 22 – Metodologia adotada.	76
Figura 23 – Sistema-teste IEEE 34 barras (modificado).	77
Figura 24 – Sistema-teste IEEE 69 barras.	78
Figura 25 – Arquitetura do relé digital implementado.	80
Figura 26 – Fluxograma para modelagem de fusíveis e religadores.	81
Figura 27 – Bloco religador digital.	82
Figura 28 – Modelo do GFV utilizado.	84
Figura 29 – Desempenho dos cenários <i>fuzzy</i> analisados.	88
Figura 30 – Detecção de alteração do estado do disjuntor e da potência do SDEE.	88
Figura 31 – Defuzzificação para obter o novo valor da corrente da I_p	89
Figura 32 – Coordenograma com SPA _{fuzzy} respeitando a técnica <i>fuse-fase</i>	89
Figura 33 – Estudos de caso no sistema-teste IEEE 34 barras.	90

Figura 34 – Caso 1: atuação da proteção tradicional com $R_f = 5 \Omega$	91
Figura 35 – Caso 1: atuação da proteção tradicional com $R_f = 20 \Omega$	92
Figura 36 – Caso 2: atuação da proteção tradicional.	93
Figura 37 – Defuzzificação no <i>fuzzy Logic Toolbox</i>	93
Figura 38 – Caso 2: atuação da proteção do SPA _{fuzzy}	94
Figura 39 – Caso 3: atuação da proteção tradicional.	95
Figura 40 – Caso 4: coordenograma com violação da técnica <i>fuse-save</i>	96
Figura 41 – Caso 4: coordenograma com SPA _{fuzzy} respeitando a técnica <i>fuse-save</i>	96
Figura 42 – Caso 5: coordenograma com violação da técnica <i>fuse-save</i>	97
Figura 43 – Caso 5: coordenograma com SPA _{fuzzy} respeitando a técnica <i>fuse-save</i>	98
Figura 44 – Caso 6: coordenograma com violação da técnica <i>fuse-save</i>	99
Figura 45 – Caso 6: coordenograma com SPA _{fuzzy} respeitando a técnica <i>fuse-save</i>	99
Figura 46 – Desempenho do SPA _{fuzzy} para faltas monofásicas.	101
Figura 47 – Desempenho do SPA _{fuzzy} para faltas bifásicas.	101
Figura 48 – Desempenho do SPA _{fuzzy} para faltas bifásicas-terra.	101
Figura 49 – Desempenho do SPA _{fuzzy} para faltas trifásicas.	102
Figura 50 – Mudança de topologia: atuação da proteção tradicional.	103
Figura 51 – Mudança de topologia: atuação da proteção do SPA _{fuzzy}	103
Figura 52 – Estudos de caso no sistema-teste IEEE 69 barras.	105
Figura 53 – Caso 1: atuação da proteção tradicional.	106
Figura 54 – Caso 1: atuação da proteção com SPA _{fuzzy}	106
Figura 55 – Caso 2: coordenograma com violação da técnica <i>fuse-save</i>	107
Figura 56 – Caso 2: coordenograma com SPA _{fuzzy} respeitando a técnica <i>fuse-save</i>	108
Figura 57 – Caso 3: coordenograma com violação da técnica <i>fuse-save</i>	109
Figura 58 – Caso 3: coordenograma com SPA _{fuzzy} respeitando a técnica <i>fuse-save</i>	109
Figura 59 – Janela do MATLAB®.	122
Figura 60 – Tela inicial de edição do FIS.	123
Figura 61 – Menu de edição das variáveis de entrada e saída.	123
Figura 62 – Edição das funções de pertinência.	124
Figura 63 – Editor da base de regras.	124
Figura 64 – Sistema <i>fuzzy</i> construído.	125
Figura 65 – Sistema-teste IEEE 34 barras.	126
Figura 66 – Sistema-teste IEEE 69 barras.	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação entre os valores das constantes k_1 e k_2 com o tipo de curva.	29
Tabela 2 – Síntese bibliográfica.	63
Tabela 3 – Termos linguísticos adotados para as variáveis do sistema <i>fuzzy</i>	72
Tabela 4 – Locais de instalação dos dispositivos de proteção e correntes de carga máxima.	81
Tabela 5 – Especificações para um painel fotovoltaico.	84
Tabela 6 – Base de dados.	85
Tabela 7 – Tempo de atuação da proteção de sobrecorrente com e sem lógica <i>fuzzy</i>	87
Tabela 8 – Variação no carregamento do alimentador.	104
Tabela 9 – Comparação entre o método proposto e outros métodos presentes na literatura.	110
Tabela 10 – Cargas pontuais do sistema-teste IEEE 34 barras.	126
Tabela 11 – Cargas distribuídas do sistema-Teste IEEE 34 barras.	127
Tabela 12 – Cargas distribuídas do sistema-teste IEEE 69 barras.	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
AB	Fases A e B
ABC	Fases A, B e C
ABCT	Fases A, B e C - Terra
ABT	Fases A e B - Terra
AT	Fase A - Terra
BC	Fases B e C
BCT	Fases B e C - Terra
BT	Fase B - Terra
CA	Fases C e A
CAT	Fases C e A - Terra
CT	Fase C - Terra
CTI	<i>Coordination Time Interval</i>
FS	Fator de Sobrecorrente
GD	Geração Distribuída
GFV	Gerador Fotovoltaico
GSE	Grupo de Sistemas Elétricos
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
IED	<i>Intelligent Electronic Device</i>
LabPro	Laboratório de Proteção Digital
MATLAB®	<i>Matrix Laboratory</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
PA	Proteção Adaptativa

RTC	Relação de Transformador de Corrente
SDEE	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
SE	Subestação
SFV	Sistema Fotovoltaico
SPA_{fuzzy}	Sistema de Proteção Adaptativa Fuzzy
TC	Transformador de Corrente
TDS	<i>Time Dial Setting</i>
TP	Transformador de Potencial
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Fator de crescimento de carga
$\mu_A(x)$	Função de pertinência
ΔP	Variação da potência
E_{abc}	Vetor de tensões equivalente Thévenin
$E_D(k)$	Variação do estados dos disjuntores
$I_{carga,max}$	Corrente máxima de carga
FS	Fator de segurança
I_{cc}	Corrente de curto-circuito
I_0	Corrente de saturação de diodo
I_d	Corrente do diodo
I_{deseq}	Corrente de desbalanço máxima entre fases admitidas
$I_{f,min}$	Corrente de curto-circuito monofásica no final do trecho
I_{2f}	Corrente de curto-circuito bifásica
nI	Fator de idealidade do diodo
$I_{nom,elo}$	Corrente nominal do elo fusível
I_{NP}	Corrente nominal primária do TC
IP_{abc}	Matriz de injeção de correntes no ponto de falta
$I_{p,fase}$	Corrente de <i>pickup</i> de fase
$I_{p,neutro}$	Corrente de <i>pickup</i> de neutro
FC	Fator de crescimento
N_{cell}	Número de células ligadas em série no módulo
$t_{max,int-Pttr}$	Tempo de máxima interrupção do elo fusível protetor
$t_{min,fus-Ptgd}$	Tempo de mínima fusão do elo fusível protegido
P_0	Potência instantânea calculada no início da simulação

p_k	Potência instantânea
q	Carga do elétron
t_{op}	Tempo de operação
$t_{relé,i}$	Tempo de atuação do relé de sobrecorrente para a corrente i
V_d	Tensão do diodo
Y	Matriz admitância equivalente do sistema
Z_{EQ}	Matriz de impedância equivalente do sistema
Z_{EQ}	Matriz impedância de falta equivalente
Z_{TOT}	Matriz de impedância equivalente total do sistema

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Motivação	21
1.2	Objetivos	22
1.3	Contribuições	23
1.4	Organização do Texto	23
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1	Sistema de Distribuição de Energia Elétrica	24
2.2	Sistema de Proteção	25
2.2.1	Chaves Fusíveis	26
2.2.1.1	Dimensionamento de elos fusíveis	27
2.2.2	Religadores	28
2.2.2.1	Dimensionamento de religadores	28
2.2.3	Relé de Sobrecorrente	29
2.2.3.1	Dimensionamento de relés de sobrecorrente	30
2.3	Coordenação da Proteção	31
2.3.1	Seletividade entre Elos Fusíveis	31
2.3.2	Seletividade Relé - Elo fusível	31
2.3.3	Seletividade Relé - Religador	32
2.3.4	Coordenação Religador - Religador	32
2.3.5	Coordenação Religador - Elo fusível	32
2.4	Geração Distribuída	35
2.4.1	Histórico	35
2.4.2	Painéis Fotovoltaicos	36
2.4.3	Sistemas Fotovoltaicos	38
2.4.4	Impactos da GD nos Níveis de Curto-Circuito e Fluxo de Potência	39
2.5	Proteção Adaptativa (PA)	42
2.6	Lógica <i>Fuzzy</i>	44
2.6.1	Conjuntos <i>Fuzzy</i> e Funções de Pertinência	44
2.6.2	Operações entre Conjuntos <i>Fuzzy</i>	46
2.6.2.1	União	46
2.6.2.2	Intersecção	47
2.6.3	Sistema Lógico <i>Fuzzy</i>	47
2.7	Considerações Finais	49
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	50
3.1	Impactos da Inserção da GD na Proteção do SDEE	50
3.2	Proteção Adaptativa	56
3.3	Lógica <i>fuzzy</i> na Proteção de Sobrecorrente	59

3.4	Síntese da Revisão Bibliográfica	62
3.5	Considerações Finais	64
4	SISTEMA PROPOSTO	65
4.1	Arquitetura do Sistema	65
4.1.1	Monitoramento dos Canais Digitais	65
4.1.2	Monitoramento dos Canais Analógicos	67
4.1.3	Cálculo dos Novos Ajustes	68
4.2	Elaboração do Sistema <i>Fuzzy</i>	70
4.3	Envio dos Novos Ajustes	74
4.4	Considerações Finais	74
5	MATERIAIS E MÉTODOS	76
5.1	Metodologia	76
5.2	Sistema-Teste	76
5.2.1	Sistema-Teste IEEE 34 barras	77
5.2.2	Sistema-Teste IEEE 69 barras	78
5.3	Modelagem dos Dispositivos de Proteção	79
5.3.1	Relé de Sobrecorrente Direcional	79
5.3.2	Fusível	80
5.3.3	Religador Digital	81
5.3.4	Disjuntor	83
5.4	Sistema Fotovoltaico	83
5.5	Lógica <i>Fuzzy</i>	84
5.6	Base de dados	85
5.7	Considerações Finais	85
6	ANÁLISE E RESULTADOS	86
6.1	Definição do Número de Variáveis Linguísticas	86
6.2	Exemplo do Funcionamento do SPA _{fuzzy}	87
6.3	Estudos de Caso: Sistema-teste IEEE 34 barras	90
6.3.1	Caso 1	90
6.3.2	Caso 2	92
6.3.3	Caso 3	94
6.3.4	Caso 4	95
6.3.5	Caso 5	97
6.3.6	Caso 6	97
6.3.7	Discussão dos Resultados	100
6.3.8	Mudança de Topologia	100
6.3.9	Variação no Carregamento do Alimentador	102
6.4	Estudos de Caso: Sistema-teste IEEE 69 barras	104
6.4.1	Caso 1	105

6.4.2	Caso 2	107
6.4.3	Caso 3	108
6.5	Comparação com a Literatura	110
6.6	Considerações Finais	110
7	CONCLUSÕES	112
	REFERÊNCIAS	115
	APÊNDICE A <i>Toolbox</i> da Lógica <i>Fuzzy</i> no MATLAB®	122
	ANEXO A Sistema-Teste IEEE 34 barras	126
	ANEXO B Sistema-teste IEEE 69 barras	128

INTRODUÇÃO

O fornecimento de energia elétrica por meio de fontes renováveis constitui atualmente, um insumo energético fundamental para a sociedade moderna e representa um tema de importância crescente na área de distribuição de energia elétrica. Devido ao rápido crescimento da demanda de energia e às exigências crescentes dos consumidores, as concessionárias de energia elétrica vêm ampliando sua capacidade de geração de energia elétrica, inserindo novas fontes energéticas, constituindo o que se denomina de Geração Distribuída (GD).

A inserção da GD traz inúmeros benefícios para o Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE), como redução da emissão de gases poluentes, elevação da confiabilidade energética, alívio do carregamento de alimentadores e redução das perdas nas linhas de distribuição, decorrente da proximidade da instalação da GD com as cargas. Dentre as diversas fontes de GD utilizadas, destaca-se o Gerador FotoVoltaico (GFV), o qual apresenta baixa emissão de ruídos, impactos ambientais reduzidos e grande disponibilidade de energia primária (PINTO *et al.*, 2016).

Apesar das suas muitas vantagens, a GD pode provocar diversos impactos negativos, inclusive modificando a arquitetura tradicional dos SDEE, caracterizada principalmente pela radialidade e fluxo de potência/corrente unidirecional no sentido subestação-carga. Como resultado, o fluxo de potência passa a ser bidirecional, podendo promover modificações em variáveis elétricas do alimentador (como o nível de tensão, o fator de potência, o fluxo de potência e as correntes de carregamento e curto-circuito), o que pode comprometer o desempenho do sistema de proteção e, como consequência, afetar os indicadores de continuidade de serviço e, portanto, o desempenho das concessionárias de energia elétrica. No caso particular dos SDEE tradicionais, o sistema de proteção é constituído predominantemente por relés de sobrecorrente, religadores e fusíveis, os quais são configurados de modo a operarem de forma coordenada. O esquema de coordenação usual baseia-se no princípio da sobrecorrente, o qual adota como grandeza de atuação a corrente no sistema e sua atuação se dá quando a corrente medida atinge um valor maior ou igual a um limite previamente estabelecido (NASCIMENTO, 2020). Apesar disso, a análise do estado da arte revelou que muitos trabalhos não consideram a coordenação da proteção considerando os três dispositivos de proteção e realizar a coordenação dos fusíveis com os dispositivos digitais pode ser uma tarefa laboriosa.

Diante dos desafios resultantes da presença da GD nos SDEE, pesquisas diversas

vêm sendo realizadas e, no caso particular dos impactos provocados nos sistemas de proteção, destaca-se nesta Tese o uso de duas vertentes que foram combinadas para propor um novo esquema de proteção, que são a lógica *fuzzy* e Proteção Adaptativa (PA), especialmente pelo fato dessa combinação permitir ajustes dos dispositivos digitais de sobrecorrente de forma rápida, *online* e considerando as mudanças nas variáveis elétricas do alimentador decorrentes da inserção da GD. Em particular a corrente de *pickup* I_p , variável que é ajustada considerando a radialidade do SDEE e é impactada com as alterações decorrentes da presença da GD, afetando a coordenação da proteção de sobrecorrente.

1.1 MOTIVAÇÃO

Em muitas concessionárias de energia elétrica, a coordenação da proteção ainda é realizada de maneira rudimentar, com pouca automação e forte dependência da experiência de profissionais qualificados. Ao mesmo tempo, sabe-se que a presença dos GFV nos SDEE requer atualizações constantes nas configurações de proteção, visando acomodar a geração intermitente de energia da GD. Isso implica na necessidade de cálculos repetitivos para obter a coordenação ideal, sujeitos a imprecisões e propensos a erros. Portanto, as metodologias tradicionais têm se mostrado insuficientes para garantir o funcionamento adequado do sistema de proteção dos SDEE na presença da GD, em virtude das mudanças nos níveis das correntes de curto-circuito e do carregamento do sistema, as quais modificam a sensibilidade e a atuação correta dos dispositivos de proteção. Diante desse problema não trivial, torna-se necessário desenvolver novos procedimentos para calcular as configurações de proteção.

Dada a relevância dos desafios acima mencionados, o uso de métodos de otimização (como programação linear, algoritmo genético e enxame de partículas) e técnicas de inteligência artificial, como lógica *fuzzy*, têm sido propostos para realizar o cálculo das configurações da proteção de sobrecorrente nos SDEE (VASCONCELOS *et al.*, 2022). Nesta pesquisa, optou-se pela utilização da lógica *fuzzy* na solução proposta, pois é uma ferramenta recomendada para problemas com incertezas (caso do SDEE com inserção da GD), permite a realização de ajustes *online*, além da sua flexibilidade, não necessita de um modelo matemático complexo na solução do problema, pode ser utilizada em *hardwares* com processamento e memória limitados (é o caso dos dispositivos digitais) e possibilita a combinação do conhecimento dos engenheiros de proteção, que já realizam os estudos de coordenação de proteção nas concessionárias, com ferramentas matemáticas. Tal combinação permite o cálculo confiável dos ajustes, tornando o sistema de proteção mais robusto e reduzindo as chances de falha. Outro fator determinante na escolha da lógica *fuzzy* é a possibilidade de adaptar dinamicamente os cálculos da coordenação de sobrecorrente às alterações nas cargas e na topologia do alimentador ou

mesmo falhas em componentes do sistema de proteção, garantindo proteção adequada em todas as situações, ao contrário de outros métodos de otimização (VASCONCELOS *et al.*, 2022).

Neste cenário, a PA surge como uma alternativa promissora, pois enquanto a lógica *fuzzy* é a ferramenta matemática que irá realizar o cálculo dos ajustes dos dispositivos de sobrecorrente, o esquema adaptativo é o mais indicado para adaptar-se às rápidas transformações que ocorrem nos SDEE atuais com inserção da GFV, permitindo gerenciar sistemas de energia que estão cada vez mais bidirecionais e dinâmicos, sendo o ente responsável por fornecer os dados de entrada para o cálculo dos novos ajustes e enviá-los aos relés e religadores de forma *online*. Nesse contexto, propõe-se um sistema que combina PA e lógica *fuzzy*, visando ajustar automaticamente as funções de proteção às condições operacionais, acomodando variações na topologia do SDEE monitorado nas configurações calculadas.

Diante da relevância do tema Proteção de Sistemas Elétricos, o Grupo de Sistemas Elétricos (GSE) do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) vem conduzindo diversas pesquisas ao longo dos anos, dentre as quais destacam-se as pesquisas relacionadas com coordenação da proteção, em particular dos SDEE (OLIVEIRA, 2010; SOUZA JR., 2016; NASCIMENTO, 2020). Este fato constituiu outro fator motivador para o desenvolvimento desta Tese, ou seja, dar continuidade a essa linha de pesquisa, cujos objetivos são apresentados a seguir.

1.2 OBJETIVOS

Esta Tese tem como objetivo geral apresentar um novo esquema de coordenação dos dispositivos de proteção direcional de sobrecorrente baseado em PA e lógica *fuzzy* quando há inserção da GD do tipo fotovoltaica no SDEE. Como objetivos específicos, os seguintes itens podem ser elencados:

- Empregar a lógica *fuzzy* como ferramenta matemática para determinar a corrente de *pickup* dos relés e religadores digitais;
- Utilizar o conhecimento do especialista em proteção de sistemas elétricos na etapa de construção das regras *fuzzy*;
- Desenvolver um esquema de PA simulado em ambiente Simulink (MATLAB®);
- Considerar a coordenação entre todos os elementos, ou seja, relé, fusível e religador;
- Avaliar os impactos da GD na coordenação do sistema de proteção.

1.3 CONTRIBUIÇÕES

O avanço tecnológico, especialmente no contexto das redes inteligentes e da GD, tem alterado a topologia e a arquitetura tradicional dos SDEE, modificando os seus fluxos de corrente e níveis de curto-circuito, fazendo com que as metodologias tradicionais sejam insuficientes para garantir o funcionamento adequado dos dispositivos de proteção de sobrecorrente nos SDEE. Portanto, a proposição de novas metodologias e técnicas que permitam automatizar etapas tradicionalmente realizadas de modo laborioso podem contribuir de forma significativa na melhoria da confiabilidade e da qualidade dos serviços relacionados aos SDEE.

Neste contexto, infere-se como principal contribuição desta Tese o uso combinado de um esquema de PA e lógica *fuzzy* para realizar a coordenação com os três elementos de proteção de sobrecorrente quando há inserção da GD. Outras contribuições são: i) um sistema de PA que ajusta automaticamente as configurações da proteção *online* com base na corrente de carga e corrente de curto-circuito; ii) um sistema de PA centralizado que pode processar múltiplas informações do SDEE a partir dos sinais digitais fornecidos pelos dispositivos de proteção digitais, sendo capaz de reduzir a complexidade das operações de uma subestação e propor uma forma de solucionar o problema da coordenação de sobrecorrente na presença da GFV.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O texto foi organizado em sete capítulos, além deste capítulo introdutório, conforme a seguir:

- Capítulo 2: revisão bibliográfica dos trabalhos considerados mais relevantes referentes aos temas impactos da inserção da GD na proteção de SDEE, PA e lógica *fuzzy*;
- Capítulo 3: fundamentação teórica requerida para o desenvolvimento da pesquisa;
- Capítulo 4: detalhamento do sistema de PA com lógica *fuzzy* proposto;
- Capítulo 5: apresentação da metodologia utilizada;
- Capítulo 6: exposição e discussão dos resultados obtidos;
- Capítulo 7: conclusões.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Um resumo dos temas mais importantes para o desenvolvimento da pesquisa é discutido a seguir. Inicialmente, apresentam-se os fundamentos de um SDEE tradicional e seu respectivo sistema de proteção, destacando-se o relé de sobrecorrente (função 51), fusível e religador. Em seguida, apresentam-se os princípios da coordenação entre esses dispositivos de proteção. Apresenta-se uma breve introdução ao tema GD, focando nos sistemas fotovoltaicos e seus possíveis impactos no sistema de proteção. O capítulo é concluído com um resumo dos fundamentos da PA e da teoria sobre lógica *fuzzy*.

2.1 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O SDEE constitui uma parte fundamental do Sistema Elétrico de Potência, podendo ser definido como o conjunto de linhas, Subestações (SE) e demais equipamentos associados, necessários à interligação elétrica entre o sistema de transmissão ou geração e as instalações dos consumidores finais, operando sob concessão do Estado a fim de atender as demandas de energia de uma localidade com qualidade e segurança.

Dado o seu propósito de fornecer energia ao consumidor a qualquer distância ou exigência da carga, o SDEE tem características bem diferentes quando comparado ao sistema de transmissão, por exemplo (SOUZA, 1997): intensidade e densidade de carga, tipo de consumidor, configuração, nível de tensão e número de fases e de condutores. Na estrutura do SDEE, destaca-se a rede de distribuição, usualmente denominada de alimentador, a qual é constituída pelo tronco e ramais de derivação. O tronco é a parte principal de um alimentador, sendo caracterizado por ter a maior seção de condutores e atender a maior parcela ou ao total da carga do alimentador. Os ramais de derivação constituem a parte do alimentador que deriva do tronco, possuindo na maioria das vezes, condutores de seções menores. Usualmente, os alimentadores são predominantemente radiais podendo ser trifásicos, bifásicos ou monofásicos com diferentes níveis de tensões, dependendo do padrão adotado pela concessionária de energia elétrica, por exemplo: 11,4 kV, 13,8 kV, 22,0 kV e 34,5 kV.

Na prática, os SDEE estão sujeitos a várias ocorrências, ou seja, a eventos ou ações que podem levar o sistema a operar fora de suas condições normais, o que pode comprometer a qualidade do serviço prestado. Assim, o projetista do sistema de proteção deve assegurar o melhor conjunto de ajustes dos diversos equipamentos de proteção que atenderá aos níveis de qualidade de energia exigidos tanto pelos clientes quanto pelos

órgãos reguladores.

Independente da natureza e do tipo da ocorrência, os equipamentos de proteção devem ser selecionados, dimensionados e parametrizados de tal forma que protejam o SDEE nas diversas condições de falhas. Para isso é necessário levar em consideração algumas informações básicas sobre o sistema a ser protegido para que possa ser desenvolvido um projeto adequado, garantindo a confiabilidade do sistema de proteção, tais como (ENERGISA, 2017):

- Topografia e topologia do sistema;
- Índices cerâmicos a que o sistema está sujeito;
- Levantamento da localização da vegetação que pode interferir no SDEE;
- Classe predominante do cliente: residencial, comercial, industrial, rural;
- Tipo de atividade e processo de fabricação dos clientes industriais que necessitam de atenção especial;
- Disponibilidade de equipamentos de proteção;
- Equipamentos de proteção instalados no SDEE;
- Conhecer os clientes ou cargas, bem como suas características e necessidades no fornecimento de energia elétrica;
- Manobras para atendimento de contingências;
- Recurso humano e logístico disponível para o atendimento.

2.2 SISTEMA DE PROTEÇÃO

O Operador Nacional do Sistema (ONS) define o sistema de proteção como sendo o conjunto de equipamentos e acessórios destinados a realizar a proteção em caso de falhas elétricas, como curtos-circuitos e outras condições anormais de operação dos componentes de um Sistema Elétrico de Potência (ONS, 2008).

No contexto dos SDEE, o sistema de proteção é o ente responsável por protegê-lo contra faltas e outros distúrbios, visando evitar danos aos equipamentos e acidentes com as pessoas. A ação do sistema de proteção restaura o SDEE para a melhor condição de funcionamento possível sob as circunstâncias e segue os princípios da filosofia da proteção. Para atender a esses requisitos, o sistema de proteção deve ser (COURY *et al.*, 2011):

- Confiável: atuar somente em condições para as quais foi projetado;

- Seguro: não atuar quando não deve atuar;
- Sensível: responder às anormalidades nas condições de operação e aos curtos-circuitos para os quais foi projetado;
- Seletivo: isolar a menor porção possível do sistema, permitindo uma operação adequada do sistema remanescente;
- Veloz: remover uma situação de falta o mais rápido possível, de modo a reduzir a extensão do dano ocorrido e o tempo total de desabastecimento dos consumidores.

Dentre os objetivos inerentes do sistema de proteção, destacam-se (HOSSEINZADEH, 2008):

1. Redução do tempo de falta;
2. Redução dos custos operacionais e de manutenção;
3. Redução do número de consumidores atingidos por um defeito ou qualquer condição anormal no sistema por meio do isolamento do trecho atingido de forma a melhorar a confiabilidade do sistema como um todo;
4. Proteção dos equipamentos do sistema e das pessoas eliminando os riscos tão rápido quanto possível.

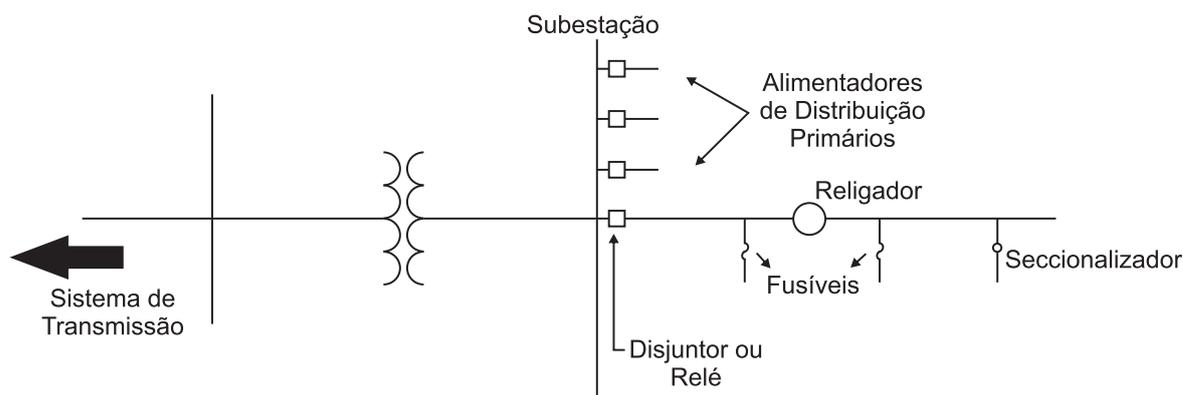
Um resumo do esquema de proteção de um SDEE tradicional é apresentado na Figura 1, cujos elementos que o compõem serão apresentados nas seções seguintes, destacando-se que: i) a coordenação entre esses componentes é bem estabelecida e realizada assumindo que o SDEE é radial (BRAHMA; GIRGIS, 2004); ii) a atuação dos dispositivos de proteção deve ser coordenada com base na relação tempo *versus* corrente (IEEE, 2007).

2.2.1 Chaves Fusíveis

As chaves fusíveis são os dispositivos de proteção mais empregados nos SDEE devido ao seu baixo custo, tendo como função básica interromper o circuito elétrico quando ocorrer a fusão do elo fusível, assim como fechamento ou abertura manual do circuito, sob certas condições de carga (ELETROBRÁS, 2020). São utilizadas na proteção de derivações de ramais de alimentadores, bancos de capacitores, transformadores de distribuição e nas cabines primárias das SE dos consumidores.

Os elos fusíveis constituem a parte ativa da chave fusível, ou seja, são os elementos sensores que detectam a sobrecorrente e interrompem o circuito. São classificados

Figura 1 – Esquema de proteção de um SDEE tradicional.



Fonte: Reproduzido de NASCIMENTO (2014).

de acordo com a sua taxa de velocidade (*Speed Ratio*), também conhecida como relação de rapidez, em rápidos, lentos e muito lentos, designados pelas siglas K, T e H, respectivamente (FRAZÃO, 2019).

A principal desvantagem das chaves fusíveis é atuar para qualquer tipo de defeito no sistema, seja ele transitório ou permanente, causando a interrupção do fornecimento de energia elétrica em situações muitas vezes desnecessárias, especialmente para os defeitos transitórios que possuem maior taxa de ocorrência. Quando ocorre atuação do dispositivo, é necessário realizar a substituição do elo, fazendo com que os consumidores interrompidos tenham que esperar a equipe de operação. A situação torna-se ainda mais agravante quando a intervenção do defeito ocorre em regiões do sistema onde o acesso para as equipes de operação é precário, fazendo com que os consumidores fiquem sem energia por um tempo muito maior (RODRIGUES, 2021).

2.2.1.1 Dimensionamento de elos fusíveis

O dimensionamento dos elos fusíveis é realizado de forma tradicional, conforme Inequações 1 e 2 (ELETROBRÁS, 1982).

$$FC \cdot I_{\text{carga,max}} < I_{\text{nom,elo}} \quad (1)$$

$$I_{\text{nom,elo}} \leq \frac{I_{f,\text{min}}}{4} \quad (2)$$

Sendo: $I_{\text{carga,max}}$ a corrente máxima de carga que circulará através do elo fusível, medida no ponto de instalação do mesmo; $I_{\text{nom,elo}}$ a corrente nominal do elo fusível; $I_{f,\text{min}}$ a corrente de curto-circuito monofásica no final do trecho protegido pelo elo; FC é definido como sendo o fator de crescimento de carga em um horizonte de estudo, dado por: $FC = \left(1 + \frac{X\%}{100}\right)^a$, em que X% é o fator percentual de crescimento de carga anual e a é o número de anos considerado como horizonte de estudo.

2.2.2 Religadores

Os religadores são equipamentos que podem ser utilizados na proteção de saída de alimentadores, ao longo do tronco dos alimentadores para reduzir a quantidade de clientes afetados durante um distúrbio e na proteção de derivações ou ramais. Estes equipamentos são responsáveis por proteger o SDEE de distúrbios transitórios, realizando um ciclo pré-programado de comandos (aberturas e fechamentos), definindo o que se chama de ciclo de operação, até a eliminação da falta.

A execução de religamentos automáticos tem como função executar testes de recomposição do circuito após sua interrupção, devido à uma condição de defeito no sistema. Se o defeito ocorrer dentro da zona de proteção do religador, este deverá atuar e iniciar seu ciclo de operação. Caso a falta seja permanente, o religador ficará aberto com objetivo de proteger o SDEE (*lockout*), só podendo ser religado manualmente via comando local ou por telecomando. Para faltas temporárias, são executadas operações de abertura e religamentos, mas o ciclo de operações programado não chega a ser completado, garantindo a continuidade do serviço.

O religador atua segundo uma sequência pré-definida de religamentos, onde em cada operação da sequência pode ser utilizada uma curva de operação do religador. Embora alguns fabricantes permitam curvas diferentes para cada operação do religador, outros fabricantes permitem apenas que uma dessas curvas seja selecionada para a primeira operação e outra curva para as operações subsequentes. Geralmente, para a primeira operação, utiliza-se uma curva com um tempo de operação curto (chamada de curva rápida). Para as demais operações, utiliza-se uma curva com um tempo de operação mais longo (chamada de curva lenta). Com todas estas possibilidades, uma das grandes vantagens dos religadores fica evidente: evitar que o fusível queime por uma falta temporária, conhecida como metodologia *fuse saving* (CPFL ENERGIA, 2016).

2.2.2.1 Dimensionamento de religadores

Os religadores, assim como os relés, possuem curvas de operação a tempo dependente e tempo definido para fase e neutro. A atuação dos religadores nesta Tese será realizada conforme Inequações 3 e 4, nas quais a corrente mínima de atuação é denominada de corrente de *pickup* (I_p) (ENERGISA, 2017).

$$FC \cdot I_{\text{carga,max}} \leq I_{p,\text{fase}} \leq \frac{I_{2f}}{FS} \quad (3)$$

$$I_{\text{deseq}} \leq I_{p,\text{neutro}} \leq \frac{I_{f,\text{min}}}{FS} \quad (4)$$

Sendo: $I_{p,\text{fase}}$ a corrente de *pickup* de fase do religador; I_{2f} a corrente de curto-circuito bifásico na zona de proteção do religador; FS o fator de segurança (varia de 1,5 a

2,0); I_{deseq} a corrente de desbalanço máxima entre fases admitida e $I_{\text{p,neutro}}$ corrente de atuação de proteção de neutro.

2.2.3 Relé de Sobrecorrente

Os relés de sobrecorrente usualmente utilizados no SDEE podem ser classificados conforme o tempo de atuação em: i) instantâneo, que como o nome sugere não possui temporização intencional no momento da sua atuação; ii) tempo inverso, cuja operação no tempo é inversamente proporcional ao múltiplo da corrente. Na prática, a maioria dos fabricantes apresenta a opção de acrescentar a estas funções de proteção, parâmetros como: temporização, religamento e elementos direcionais (relé de sobrecorrente direcional) (MANUAL, 2003).

Esta Tese tem como foco o relé de sobrecorrente direcional de tempo inverso (número ANSI 67/51), o qual é descrito matematicamente pela Equação 5.

$$t_{\text{op}} = \text{TDS} \cdot \frac{k_1}{\left(\frac{I_{\text{cc}}}{I_{\text{p}}}\right)^{k_2} - 1}, \quad (5)$$

em que TDS é a sigla para *Time Dial Setting*, I_{cc} é a corrente de curto-circuito, I_{p} é a corrente mínima para atuação do relé e k_1 e k_2 são as constantes que definem a curva de operação do relé. Embora os fabricantes de relés ofereçam várias curvas de sobrecorrente de tempo inverso, utilizam-se nesta Tese apenas as curvas IEC apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Relação entre os valores das constantes k_1 e k_2 com o tipo de curva.

Curva	k_1	k_2
Normal inversa	0,14	0,02
Muito inversa	13,5	1,0
Extremamente inversa	80,0	2,0

Fonte: STANDARD (1976).

O parâmetro TDS possui limites de acordo com as curvas do relé utilizadas e a posição do relé na cadeia de coordenação, obedecendo ao princípio da seletividade, conforme Inequação 6.

$$\text{TDS}_{i,\text{min}} \leq \text{TDS}_i \leq \text{TDS}_{i,\text{max}}, \quad (6)$$

sendo $\text{TDS}_{i,\text{min}}$ e $\text{TDS}_{i,\text{max}}$ os valores mínimos e máximos do parâmetro TDS para o relé i , respectivamente. Para relés com o tipo de curva IEC, o intervalo do parâmetro TDS é [0,05; 1,00], variando com passo de 0,01 (MANUAL, 2003).

2.2.3.1 Dimensionamento de relés de sobrecorrente

O processo de parametrização da função 51 requer que I_p seja maior que a corrente de carga do local onde o relé está instalado. Caso o valor de I_p esteja abaixo do valor da corrente de carga, poderá haver atuação do relé para uma situação normal. Além disso, I_p também deve ser ajustada abaixo do menor valor de curto-circuito bifásico. Os valores de I_p para a função 51 de fase estão representadas na Inequação 7:

$$I_{\text{carga,max}} < I_p < I_{2f}. \quad (7)$$

Com relação à função 51 de neutro (51N), deve-se considerar o valor do desequilíbrio natural do sistema para o ajuste dos valores de I_p , de modo a evitar que o dispositivo atue para situações usuais. Também neste caso, I_p de neutro deve ser ajustada abaixo do menor valor de curto-circuito monofásico, visando garantir a atuação em situações de faltas. O ajuste da função 51N deve ser realizado conforme Inequação 8:

$$I_{\text{deseq,max}} < I_p < I_{f,\text{min}}. \quad (8)$$

Como o relé de sobrecorrente direcional recebe níveis reduzidos de corrente do Transformador de Corrente (TC), deve-se considerar o parâmetro da Relação do Transformador de Corrente (RTC). A relação do TC que alimenta um relé deve atender aos seguintes requisitos (ALMEIDA, 2000):

- A corrente nominal primária do TC (I_{NP}) deve ser maior do que a razão entre a corrente máxima de falta ($I_{cc,\text{max}}$) no ponto da instalação e o fator de sobrecorrente (FS) do TC, conforme Inequação 9. Geralmente, adota-se FS igual a 20.

$$I_{NP} \geq \frac{I_{cc,\text{max}}}{FS}. \quad (9)$$

- A corrente nominal primária do TC deve ser maior que a corrente máxima de carga a ser considerada ($I_{\text{carga,max}}$):

$$I_{NP} \geq k \cdot I_{\text{carga,max}}, \quad (10)$$

sendo k um fator de sobrecarga definido pelo projetista.

Portanto, para o relé de sobrecorrente de tempo inverso é necessário definir três parâmetros básicos, os quais estão relacionados com a velocidade de atuação do sistema de proteção: i) ajuste do TDS (responsável por deslocar verticalmente a curva tempo versus corrente); ii) I_p (responsável por deslocar horizontalmente a curva tempo versus corrente, de modo a ajustar a corrente mínima de operação do relé); iii) tipo de curva.

2.3 COORDENAÇÃO DA PROTEÇÃO

No estudo de um sistema de proteção, o princípio básico a ser considerado é a rápida eliminação dos efeitos decorrentes de faltas temporárias e a redução dos efeitos causados por faltas permanentes à menor área possível, de tal modo que os serviços possam ser restaurados no menor intervalo de tempo. Para aplicação e coordenação dos diversos dispositivos de proteção, é necessário conhecer as regras de coordenação e as características dos equipamentos. Dessa forma, o engenheiro de distribuição estará apto a proceder aos estudos de proteção com precisão e otimização dos custos e benefícios (GUIGUER, 1988). Apresentam-se a seguir, as fórmulas e os limiares adotados para manter o sistema de proteção coordenado.

2.3.1 Seletividade entre Elos Fusíveis

A seletividade entre elos fusíveis ocorre quando o dispositivo protetor elimina a falta (temporária ou permanente) antes que o dispositivo protegido. Dessa forma, evita-se desconexão de um trecho maior do alimentador ou ramal. Para determinação da região de seletividade entre elos, adotam-se as seguintes práticas: i) a seletividade entre o elo fusível protegido e o elo fusível protetor será satisfatória quando o tempo máximo de interrupção do elo protetor for no máximo 75% do tempo mínimo de fusão do elo protegido, em toda faixa de seletividade, conforme Inequação 11; ii) uso de tabelas disponibilizadas por fabricantes de elos fusíveis, sendo este método o mais empregado e considerado o mais conveniente para coordenação entre elos fusíveis (GÖNEN, 2008).

$$t_{\max, \text{int-Pttr}} \leq 0,75 \cdot t_{\min, \text{fus-Ptgd}}, \quad (11)$$

sendo: $t_{\max, \text{int-Pttr}}$ o tempo de máxima interrupção do elo fusível protetor e $t_{\min, \text{fus-Ptgd}}$ o tempo de mínima fusão do elo fusível protegido.

2.3.2 Seletividade Relé - Elo fusível

O estudo de coordenação entre relé e elo fusível será realizado apenas para o caso do elo fusível instalado no lado da carga, pois não é usual a utilização dos fusíveis instalados à montante do relé. Para garantir a seletividade entre esses dispositivos, é necessário que o elo fusível atue antes do relé. Para isso, a curva temporizada do relé deve estar no mínimo 0,2 segundos acima da curva de tempo total do elo, conforme Inequação 12 (GÖNEN, 2008). Ao garantir essa diferença de tempo entre a curva do relé e a curva de máxima interrupção do elo fusível, pode-se verificar a coordenação entre esses dispositivos para as correntes de curto-circuito de interesse.

$$t_{\text{relé}, i} - t_{\max, \text{int-elo}, i} \geq 0,2\text{s}, \quad (12)$$

sendo: $t_{\text{relé}, i}$ o tempo de atuação do relé de sobrecorrente para a corrente i e $t_{\max, \text{int-elo}, i}$ o tempo de máxima interrupção do elo fusível para a corrente i .

2.3.3 Seletividade Relé - Religador

Para a coordenação entre relé e religador, o relé normalmente funciona como proteção de retaguarda, sendo instalado na SE, enquanto que o religador é instalado ao longo do alimentador. Para garantir a coordenação correta, as curvas de operação dos relés devem ser escolhidas após a definição das curvas de atuação do religador, considerando os tempos de religamento do religador e o tempo de rearme dos relés. Assim, um dos critérios para coordenação e seletividade desses elementos é a diferença de pelo menos 0,2 segundos entre as curvas dos relés (fase e neutro) em relação às curvas do religador (ELETROBRÁS, 1982; ENERGISA, 2017).

É importante observar que se o religador estiver instalado dentro da zona de proteção de um relé, deve-se garantir que os relés não atuem durante a sequência de operação do religador até a eliminação da falta ou bloqueio do mesmo (GÖNEN, 2008).

2.3.4 Coordenação Religador - Religador

De acordo com GÖNEN (2008), religadores eletrônicos possuem uma família de curvas e vários valores disponíveis de correntes de atuação, o que os tornam adaptáveis às necessidades para atingir a coordenação. Com relação às curvas de tempo *versus* corrente, podem ser escolhidas curvas buscando garantir o melhor uso das atuações rápidas e temporizada. Entretanto, é importante destacar que os religadores costumam ser programados para, em sua primeira sequência de atuação, operar rapidamente uma ou duas vezes, seguida de operações temporizadas. Então, a coordenação entre dispositivos religadores é determinada a partir do conjunto de valores de corrente, onde a diferença entre as curvas temporizadas desses elementos apresentam uma diferença de 0,2 segundos entre si (GÖNEN, 2008).

2.3.5 Coordenação Religador - Elo fusível

A coordenação entre religador e elo fusível do lado da carga é realizada a partir das curvas de tempo *versus* corrente de ambos, além das análises das correntes limites de coordenação e as correntes de falta trifásica e monofásica na zona de proteção do elo fusível (ELETROBRÁS, 1982). Para garantir a coordenação entre esses elementos, a corrente de curto-circuito monofásica mínima à jusante do elo deve ser maior que a corrente mínima de disparo de fase do religador. Caso essa condição não seja satisfeita, a coordenação deverá ser garantida dentro da zona de proteção do religador.

A melhor coordenação entre religador e elo fusível é obtida ajustando o religador com uma operação rápida e duas temporizadas. É importante que, para todos os valores de curto-circuito possíveis na zona de proteção do elo fusível, o tempo total de interrupção do elo seja maior que o tempo mínimo de abertura do religador na

curva temporizada. Com isso, evita-se a queima do elo fusível quando houver uma falta temporária, permitindo que a operação temporizada do religador elimine a falta, restabelecendo o circuito.

Basicamente existem duas formas de coordenar os religadores e fusíveis: *fuse-save* e *fuse-blow* (CPFL ENERGIA, 2016). A técnica *fuse-save* é uma filosofia que permite que durante os defeitos transitórios, um equipamento de proteção com capacidade de religamento desligue o sistema elétrico, independente da localização do defeito, antes da fusão do elo fusível mais próximo do defeito. Depois de algum tempo, o equipamento de proteção que operou religa, retornando a energia à parte desligada. Se o defeito for transitório, o sistema permanecerá ligado e se o defeito persistir, o elo fusível queimará, isolando a parte com defeito. A técnica *fuse-blow* é a filosofia contrária, que faz com que o elo fusível mais perto da ocorrência do defeito queime, mesmo para os defeitos transitórios (CARNEIRO; CEBRIAN, 2020).

Todas essas técnicas possuem vantagens e desvantagens. A metodologia *fuse-save* apresenta um menor número de elos fusíveis queimados, ocasionando a diminuição na atuação de equipes de manutenção e produzindo, dessa forma, melhores indicadores de continuidade. Por outro lado, as suas desvantagens se devem a um aumento no número de desligamentos de curta duração. A técnica *fuse-blow* possui como vantagens a menor ocorrência de religamentos de energia e apenas os consumidores localizados à jusante do elo fusível queimado serão impactados com interrupções permanentes de energia. Sua principal desvantagem acontece quando ocorre queima de elos fusíveis para faltas temporárias (FERREIRA *et al.*, 2010).

Nesta Tese adotou-se a filosofia *fuse-save* na coordenação entre religador e elo fusível, em virtude de possuir melhores indicadores de continuidade de serviço (FERREIRA *et al.*, 2010). Para ilustrar a coordenação entre religador e elo fusível, apresenta-se o caso simulado em um dos sistemas-testes utilizados nesta Tese, em particular o sistema-teste IEEE 34 barras apresentado na Figura 2 e que está descrito no Anexo A.

Considerou-se o sistema-teste sem presença de GD, um elo-fusível instalado no trecho 836-862 e um religador instalado na barra 858, parametrizado com I_p no valor de 48 A. Ao aplicar um curto-circuito bifásico na barra 862, a técnica *fuse-save* foi respeitada e a coordenação da proteção de sobrecorrente tradicional mantida, pois o religador atuou antes de ocorrer a queima do elo fusível, respeitando o intervalo de coordenação de 0,2 s entre as curvas rápidas do religador (cor laranja) e do fusível (cor verde), conforme apresentado no coordenograma da Figura 3.

Figura 2 – Sistema-teste IEEE 34 barras.

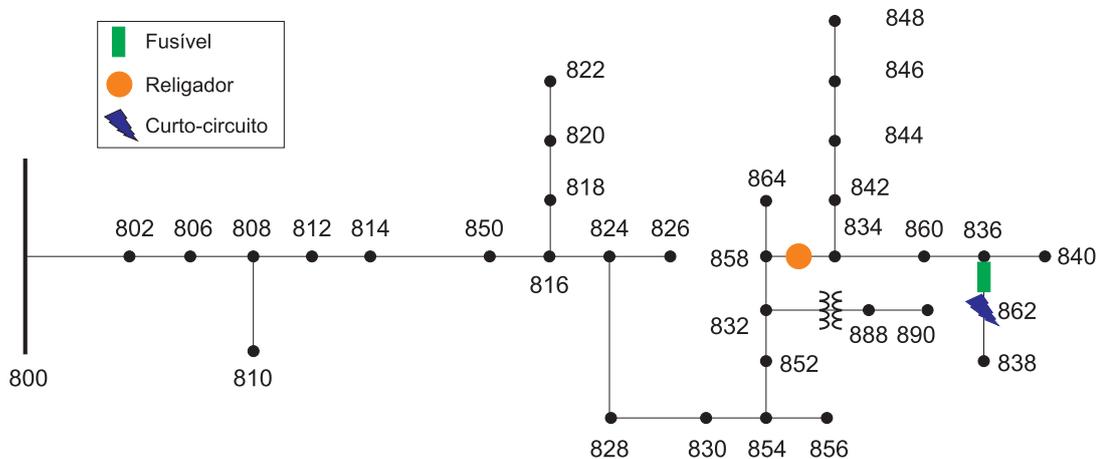
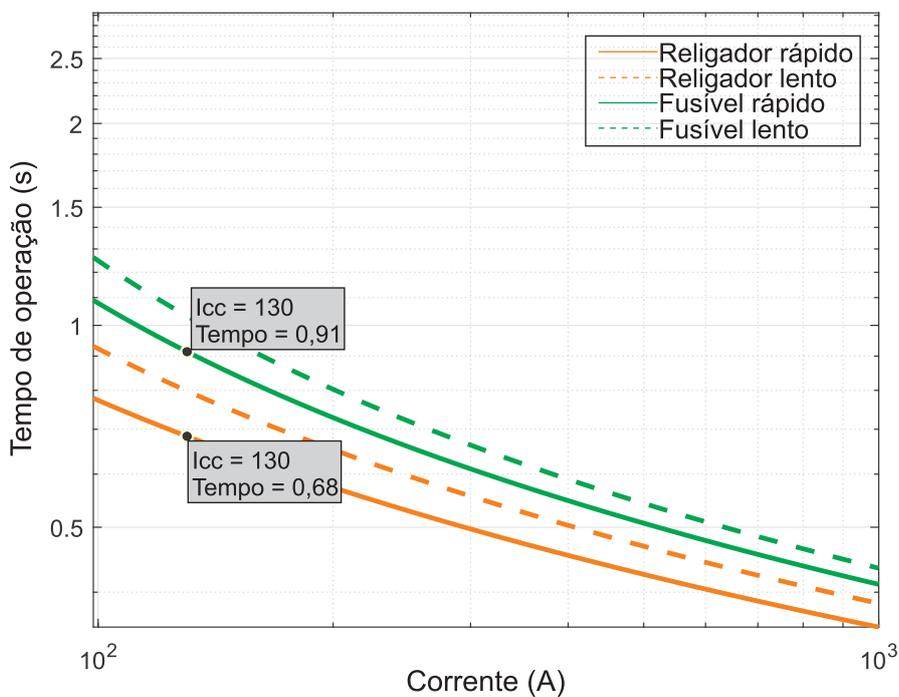


Figura 3 – Coordenograma da proteção de sobrecorrente tradicional respeitando a técnica *fuse-fase*.



2.4 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

2.4.1 Histórico

No final do século XIX a geração de energia era realizada localmente e devido às dificuldades técnicas da época, distribuída por curtas distâncias. Com isso, o modelo adotado era sempre unidirecional, isto é, do local de geração para as unidades de consumo. Os primeiros SDEE eram baseadas em corrente contínua, sendo a tensão de atendimento e a distância entre a central geradora e os consumidores limitadas. A evolução tecnológica, principalmente dos sistemas de corrente alternada, permitiu que a eletricidade fosse transportada por longas distâncias, possibilitando ainda um aumento na potência unitária e uma maior economia na construção de centrais geradoras.

O aumento da demanda de energia por parte dos consumidores resultou no Brasil em um sistema constituído por plantas geradoras de grande porte interligadas aos centros de consumo por meio de extensas linhas de transmissão e distribuição. Neste cenário, a energia flui em um único sentido: das unidades geradoras, linhas de transmissão e distribuição até chegar nos consumidores.

Em 1971, o uso de combustíveis fósseis como fonte energética para geração de eletricidade correspondia a 75,2% do total mundial. Porém, na mesma década, houve a crise do petróleo que elevou os preços dos barris de combustíveis, fazendo com que surgissem outras alternativas ao sistema elétrico global. Adicionando-se a esse fato as inovações tecnológicas, mudanças no cenário econômico e regulações ambientais, tudo isso fez crescer o interesse no uso das fontes renováveis de energia para geração de eletricidade, principalmente próxima ou nos centros de consumo.

No Brasil, a reestruturação do setor elétrico, iniciada na metade da década de 1990, redefiniu o papel do Estado no setor, introduzindo a concorrência na oferta de serviço de energia. A reforma incluiu a desverticalização das atividades, separando os segmentos de geração, transmissão, distribuição e comercialização, além de estimular a entrada da iniciativa privada no setor. EM 1995 o governo federal lançou o Projeto de Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro, onde foram traçados os princípios básicos para o novo modelo setorial (ABGD, 2020).

Em 2004, a definição de GD foi oficialmente instituída a partir do Decreto-Lei no. 5.163, tal como segue (BRASIL, 2004):

Considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquela proveniente de: I - Hidrelétrico com capacidade instalada superior a 30 MW; e II - Termelétrico, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a 75%.

A possibilidade de gerar a própria energia concretizou-se de fato apenas em 2012, a partir da Resolução Normativa no. 482, de 17 de abril de 2012. Essa Resolução autoriza a geração a partir de fontes renováveis e estabelece as condições para a microgeração (potência de até 75 kW) e minigeração (potência entre 75 kW e 10 MW) distribuída. Além disso, também foi criado o sistema de compensação, permitindo o repasse do excedente gerado ao SDEE em troca de desconto na conta de energia elétrica.

A Resolução Normativa no. 687, de 5 de novembro de 2015, ampliou o escopo das normas ao permitir a geração de energia para consumo coletivo, como condomínios, e a possibilidade de uso da energia em outra unidade pertencente ao mesmo proprietário, desde que na área de concessão da mesma distribuidora.

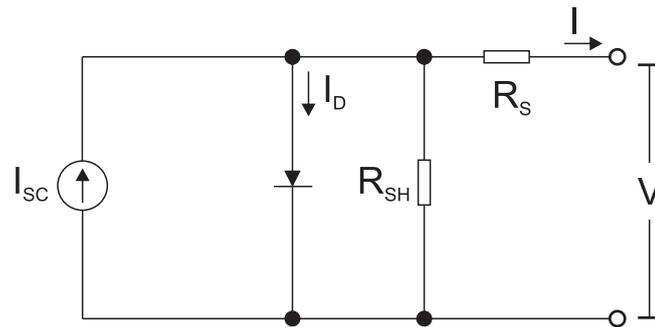
2.4.2 Painéis Fotovoltaicos

A matriz energética mundial busca cada vez mais fontes renováveis, tais como: solar, eólica, hídrica, geotérmica e biomassa, visando reduzir a inclusão de combustíveis fósseis na sua composição. Dentre estas, destaca-se a energia solar fotovoltaica que constitui o foco desta Tese. Atualmente, o Brasil possui 14.200 MW de potência instalada da fonte solar em todos os estados brasileiros, o que corresponde a 6,4% da matriz elétrica do país. Estima-se que até 2028 esse número chegue a aproximadamente 22 MW ou 9,0% da capacidade instalada do Sistema Interligado Nacional (ONS, 2024).

A energia solar fotovoltaica, obtida por meio da conversão direta da luz em eletricidade, é realizada por dispositivos fotovoltaicos de material semicondutor de modo silencioso, sem emissão de gases e sem a necessidade de um operador para o sistema. Os módulos (ou painéis) fotovoltaicos são configurados a partir da formação de células fotovoltaicas, sendo dispostos tanto na configuração série quanto paralela para alcançar o requisito de corrente e tensão desejados (BORBELY; KREIDER, 2001).

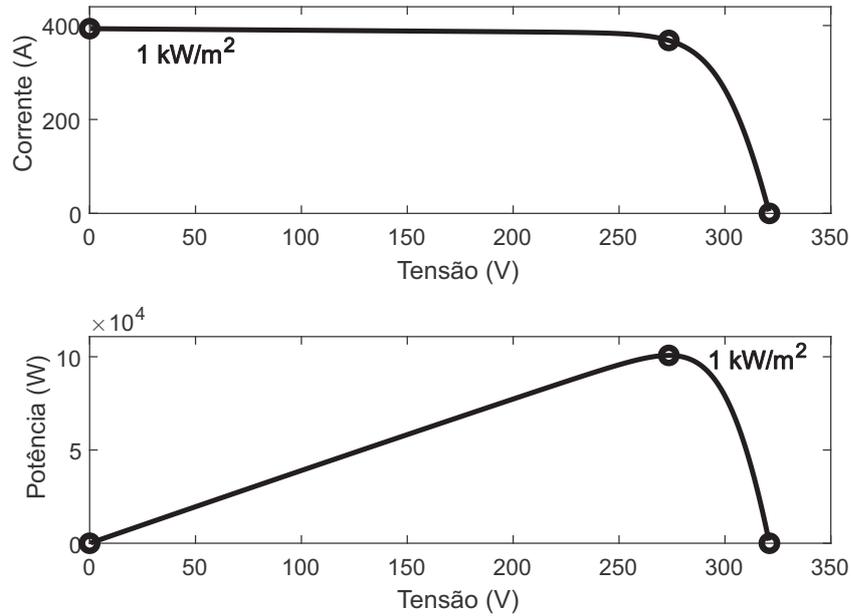
O modelo de uma célula completa é ilustrado na Figura 4, sendo constituída por quatro elementos: fonte de corrente I_L (corrente luminosa gerada), diodo, resistência série (R_s) e resistência *shunt* (R_{sh}). De acordo com esse modelo, a característica I-V para um único módulo, ilustrada na Figura 5, é definida pelas Equações 13 e 14.

Figura 4 – Modelo de uma célula fotovoltaica.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5 – Característica I-V.



Fonte: MATHWORKS (2021).

$$I_d = I_0 \cdot \left[\exp \frac{V_d}{V_T} - 1 \right], \quad (13)$$

$$V_T = \frac{kT}{q} \cdot nI \cdot N_{\text{cell}}, \quad (14)$$

sendo: I_d a corrente do diodo (A); V_d a tensão no diodo (V); I_0 a corrente de saturação de diodo (A); nI o fator de idealidade do diodo (geralmente, um valor próximo a 1,0); k a constante de Boltzmann = $1,3806e^{-23}$ J.K⁻¹; q a carga do elétron = $1,6022e^{-19}$ C; T a temperatura da célula (K) e N_{cell} o número de células ligadas em série no módulo.

Análise da Figura 5 mostra que a potência máxima de saída do módulo é obtida perto do “joelho” da sua característica. Independente das condições ambientais, a célula deverá funcionar para essa condição, a fim de maximizar a produção energética. Para isso, emprega-se a técnica de rastreamento de ponto de potência máxima (MPPT), o qual assegura que o painel fornece a sua potência máxima e para garantir a operação do painel nesse local, utiliza-se um dispositivo denominado Rastreador de Ponto de Máxima Potência.

2.4.3 Sistemas Fotovoltaicos

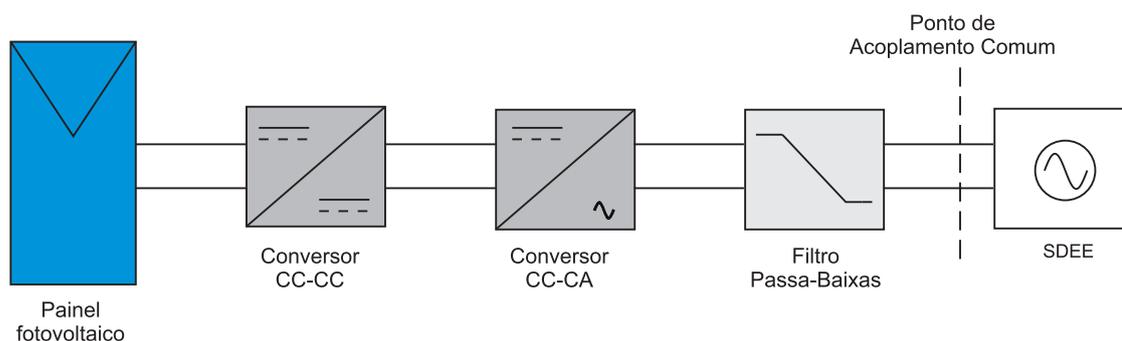
Um sistema fotovoltaico converte a energia solar em energia elétrica utilizável, tendo como características: i) ser classificado como sistemas conectados à rede e sistemas autônomos; ii) ser projetado para fornecer potência em corrente alternada (CA) ou em corrente contínua (CC). Os principais componentes de um sistema fotovoltaico típico são (MELO, 2018):

- Painéis solares: dimensionados conforme a energia requerida e possui função de transformar energia solar em eletricidade.
- Controladores de carga: servem para evitar sobrecargas ou descargas exageradas na bateria, aumentando sua vida útil e desempenho.
- Inversores: responsáveis por transformar a CC em CA, garantindo a confiabilidade e a alta eficiência energética.
- Baterias: responsáveis por armazenar a energia elétrica para que o sistema possa ser utilizado na ausência do sol.

O processo de condicionamento da energia gerada por painéis fotovoltaicos está ilustrado de forma simplificada na Figura 6 e requer dois estágios de conversão (XUE *et al.*, 2004): i) ajuste do ponto de funcionamento para que se possa extrair o máximo de potência de um determinado painel e, normalmente, uma amplificação controlada da tensão gerada também é feita simultaneamente; ii) conversão da tensão contínua em tensão alternada. Esse padrão está presente em algumas soluções comerciais de inversores. A conexão de filtros passa-baixas pode ser empregada, de modo a atenuar as harmônicas de alta frequência gerada pelo chaveamento do inversor.

No sistema fotovoltaico padrão os painéis fotovoltaicos convertem a energia solar em elétrica, fornecendo em sua saída energia na forma contínua. Os conversores estáticos garantem a qualidade da energia fornecida pelo sistema, permitindo o uso de energia solar de forma complementar aos equipamentos conectados ao SDEE, os quais requerem tensão com perfil senoidal.

Figura 6 – Topologia básica de sistemas fotovoltaicos contendo dois estágios de conversão.

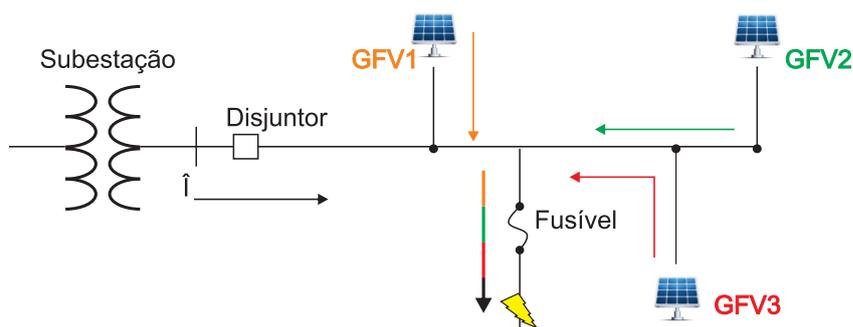


Fonte: Reproduzido de XUE *et al.* (2004).

2.4.4 Impactos da GD nos Níveis de Curto-Circuito e Fluxo de Potência

Como já mencionado, um SDEE típico possui configuração radial com fluxo de potência unidirecional no sentido da fonte primária alimentando as cargas à jusante, de modo que todos os equipamentos de proteção instalados ao longo do alimentador são projetados conforme essa premissa. Com a inserção da GD, ocorrem novos padrões de funcionamento. Devido à injeção de potência no SDEE, a GD pode ser responsável por tornar o fluxo de potência bidirecional, acarretando em novos valores de corrente de carga e curto-circuito (FRACALOSSI *et al.*, 2020). Além disso, podem ocasionar atuação indevida dos relés de proteção de sobrecorrente, sem a função de direcionalidade e, complementarmente, podem ocorrer sobretensões em vários pontos do alimentador, em virtude da variação no carregamento do alimentador, o qual tem como consequência a ocorrência de quedas de tensão, fazendo com que apareçam tensões mais elevadas nas barras, prejudicando o funcionamento dos reguladores de tensão instalados (CHEUNG *et al.*, 2009). Portanto, alterações nesses parâmetros podem significar a perda das condições normais de operação dos dispositivos de proteção instalados ao longo do alimentador, os quais foram dimensionados sem considerar a presença da GD (VARGAS *et al.*, 2018). Outros impactos relacionados à GD conectada ao SDEE são o surgimento de "pontos cegos", os quais reduzem o alcance das proteções. Um exemplo da contribuição da GD é ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Aumento do nível de curto-circuito em função das contribuições da GD.



Fonte: LUIZ (2012).

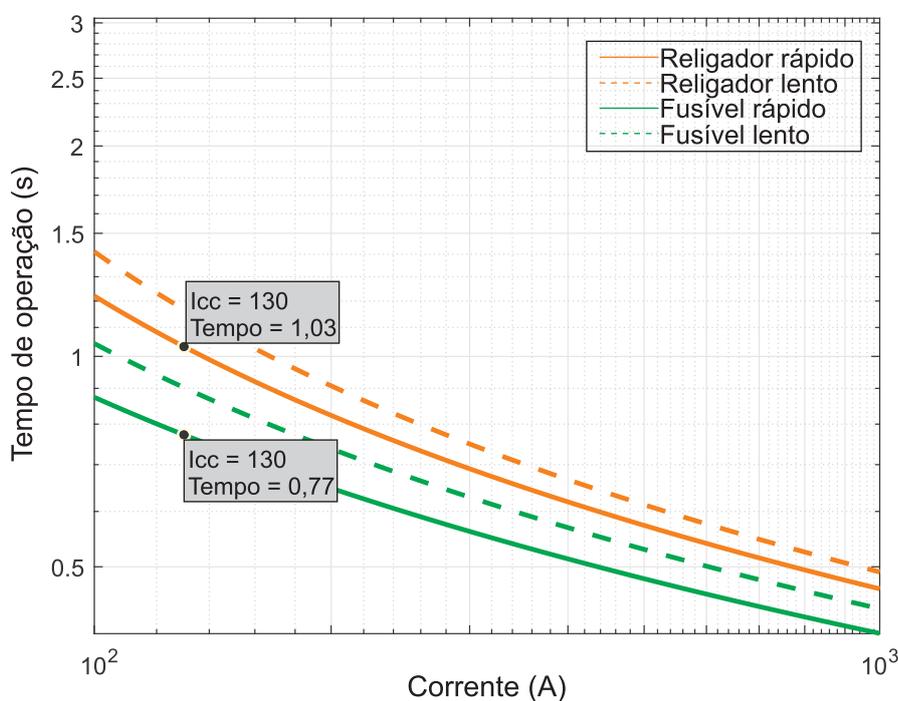
Quando ocorre uma falta temporária, os religamentos automáticos podem ter seu funcionamento alterado no momento da abertura dos contatos, pois a GD poderá tentar manter a alimentação do curto-circuito, originando outra abertura do religador no mesmo ciclo de religamentos automáticos, causando falha de operação. Neste momento de defeitos transitórios, podem surgir gradientes de tensão com deslocamentos de fase na tensão da GD gerando distúrbios capazes de prejudicar o funcionamento correto dos equipamentos de proteção (BRAGA, 2017).

Outro impacto importante comumente observado é a perda de coordenação entre religadores e fusíveis e entre religadores, pois a presença da GD pode alterar a sensibilidade ajustada nestes equipamentos. Em SDEE com proteção seletiva, a modificação do valor da corrente de defeito pode reduzir os tempos de atuação fazendo os elementos atuarem de forma simultânea, causando problemas operacionais para localizar o ponto de falta.

Para ilustrar o problema decorrente da inserção da GFV na coordenação entre religador e elo fusível, tem-se o caso apresentado na Seção 2.3.5, tendo como diferença a inserção de um GFV com potência de 400 kW na barra 836. Conforme apresentado no coordenograma da Figura 8, a técnica *fuse-save* foi violada, pois o fusível (cor verde) atuou na sua curva rápida primeiro do que o religador (cor laranja) para um curto-circuito bifásico aplicado na barra 862, ao contrário do que aconteceu no caso apresentado anteriormente, quando a inserção da GD não havia sido considerada na simulação do sistema-teste. Nota-se, também, que houve um aumento no tempo de atuação da proteção, passando de 0,68 s para o caso sem GD para 0,77 s. Portanto, demonstra-se por meio desse caso que a inserção da GD provoca a perda de coordenação entre religadores e fusíveis. No Capítulo 6, as análises desse problema serão apresentadas com maiores detalhes.

Como solução para todos esses problemas, deve-se recorrer a novos conceitos, novas configurações e estratégias de proteção alternativas, por exemplo (BOLLEN;

Figura 8 – Coordenograma da proteção de sobrecorrente tradicional com violação da técnica *fuse-save*.



HASSAN, 2011):

- Mudanças nas configurações de proteção: sempre que uma GD for conectada ao SDEE, deve-se realizar uma nova coordenação na proteção, visando minimizar possíveis problemas na coordenação;
- Disjuntores adicionais: em caso de alimentadores longos, a diferença entre a corrente de carga mais alta e mais baixa de falta deve tornar-se pequena para um religador de proteção. Isso requer a instalação de disjuntores ao longo do alimentador;
- Novos conceitos de proteção: quando dois ou mais alimentadores conectados a um mesmo transformador têm quantidade significativa de geradores, não é possível obter a seletividade apenas com a proteção de sobrecorrente. Portanto, outras soluções são necessárias, como a inclusão de um elemento direcional e um sistema de comunicação entre os relés.

De forma resumida, a manutenção da coordenação na presença da GD só é possível se todos os geradores distribuídos forem desconectados imediatamente, caso não haja alteração no esquema de proteção. Isso possibilita que o sistema retome sua característica radial, preservando as condições de coordenação. No entanto, a desconexão

da GD seria necessária até mesmo em falhas temporárias, o que não é uma solução viável (BRAHMA; GIRGIS, 2004). Dentre as várias formas propostas na literatura especializada para tratar desse problema, destaca-se nessa Tese a PA e lógica *fuzzy*, cujos fundamentos são apresentados nas seções a seguir.

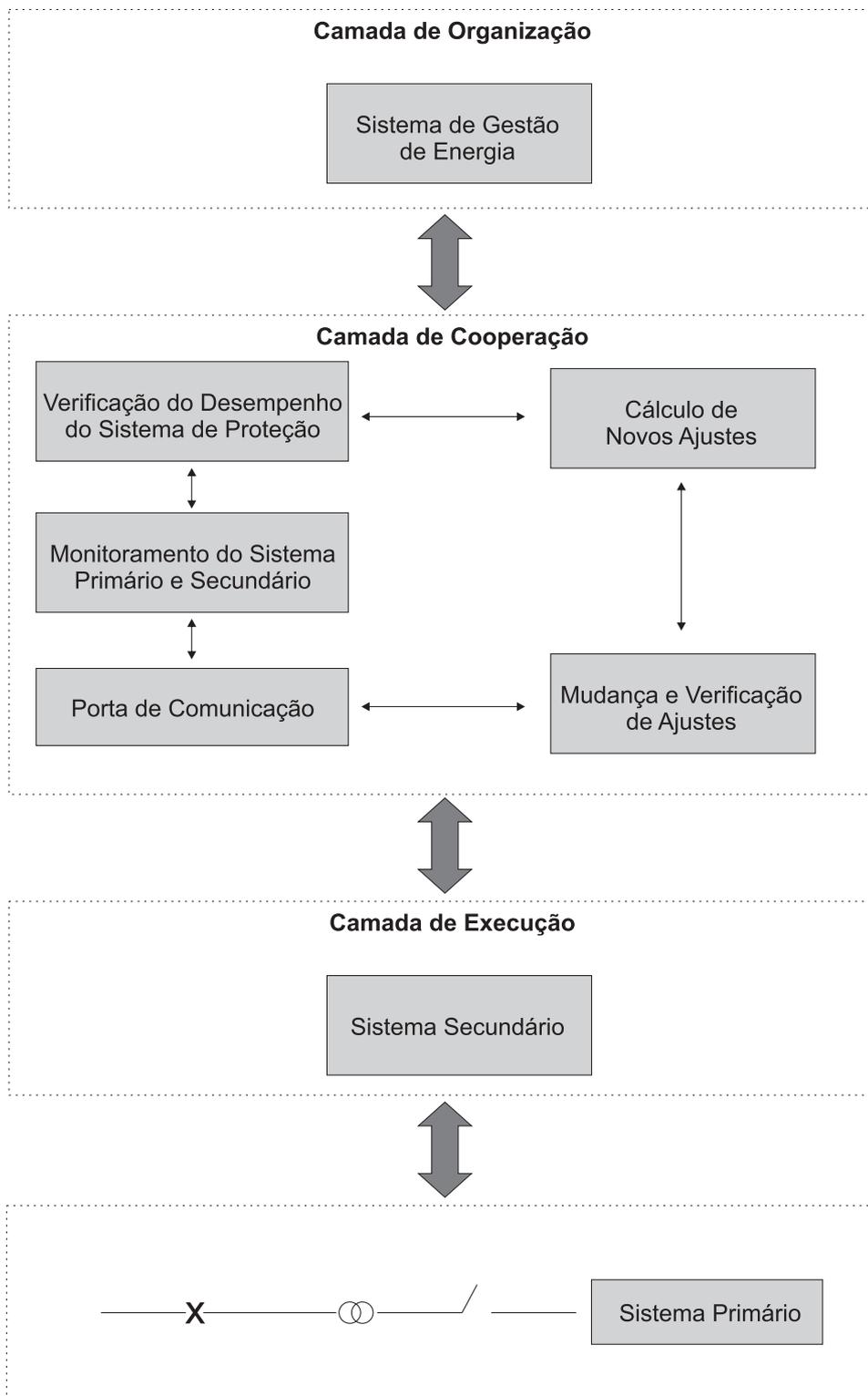
2.5 PROTEÇÃO ADAPTATIVA (PA)

De acordo com PHADKE e HOROWITZ (1990), a PA é uma filosofia que permite e busca realizar ajustes em diversas funções de proteção, com o intuito de adaptá-las às condições predominantes do SDEE, permitindo a modificação adequada dos ajustes dos dispositivos de proteção ou, no mínimo, indicando que os ajustes precisam ser atualizados. Entretanto, a implantação de um sistema de PA completo requer a existência apenas de dispositivos digitais, o que atualmente ainda não é possível de ser efetivado, haja vista a presença ainda de dispositivos eletromecânicos e estáticos no SDEE. Esses equipamentos vêm sendo substituídos gradativamente por dispositivos inteligentes baseados em microprocessadores, que permitiram a programação das funções de proteção via *software* e a comunicação com o ambiente externo, de modo que em um futuro próximo, sistemas baseados em PA constituirão sem dúvida uma realidade.

A arquitetura genérica de um sistema de PA é apresentado na Figura 9 (COFFELE, 2012), onde são definidas três camadas, as quais são descritas a seguir.

1. Camada de organização: instalada na sala de controle da SE, possui função gerencial, podendo intervir no sistema sempre que achar necessário.
2. Camada de cooperação: formada por vários blocos, conforme apresentado a seguir:
 - Verificação do desempenho do sistema de proteção: responsável por verificar o desempenho do sistema de proteção atual e compará-lo com o desempenho esperado;
 - Monitoramento dos sistemas primário e secundário: responsável por informar sobre mudanças e desempenho do sistema secundário, caso sejam detectadas mudanças no sistema primário;
 - Porta de comunicação: possibilita a interação e comunicação entre os dispositivos de proteção de sobrecorrente;
 - Cálculo de novos ajustes: responsável por realizar o cálculo dos novos ajustes, baseado nas informações da nova configuração do SDEE;
 - Mudança e verificação de ajustes: responsável por enviar os novos ajustes para os dispositivos de proteção de sobrecorrente a partir da porta de comunicação e verificar se os novos ajustes foram recebidos.

Figura 9 – Arquitetura típica de um sistema de PA.



Fonte: Adaptado de COFFELE (2012).

3. Camada de execução: composta por relés e religadores de sobrecorrente, tendo como atribuição interagir com o SDEE por meio dos TC e TP. Em caso da ocorrência de algum distúrbio, desconecta a parte afetada das demais partes do SDEE.

Em relação à arquitetura, os sistemas baseados em PA podem ser classificados do seguinte modo (NASCIMENTO, 2020):

- Arquitetura centralizada: O processamento é realizado em uma única máquina, geralmente um computador centralizado na SE, responsável por controlar todo o sistema de proteção.
- Arquitetura distribuída: O controle da PA é distribuído entre várias unidades que, em conjunto, controlam o sistema de proteção.
- Arquitetura descentralizada: Opera em várias unidades que são independentes entre si.

O foco desta Tese é a PA com arquitetura centralizada, tendo atuação na camada de cooperação e baseada em lógica *fuzzy*, a qual foi utilizada para determinar os novos ajustes dos dispositivos de proteção de sobrecorrente diante das incertezas e alterações do fluxo de potência decorrentes da inserção do GFV no SDEE.

2.6 LÓGICA FUZZY

A lógica *fuzzy* (ou lógica difusa), apresentada em 1965 por Lotfi A. Zadeh, é uma generalização da teoria clássica, na qual um elemento simplesmente pertence ou não pertence a um conjunto. Na teoria *fuzzy* o elemento poderá pertencer ao conjunto com grau de pertinência que varia no intervalo $[0,1]$, onde o valor “0” indica que o elemento não pertence ao conjunto e o valor “1” indica que o elemento pertence completamente ao conjunto.

A lógica *fuzzy* tem por essência gerar valores de saída sem a necessidade de entradas precisas. Ela fornece um método de traduzir expressões verbais vagas, imprecisas e qualitativas comuns na comunicação humana em valores numéricos, onde cada termo linguístico é interpretado como um subconjunto *fuzzy* do intervalo unitário $[0,1]$. Assim, a lógica *fuzzy* fornece subsídios para a resolução de problemas com alto grau de incerteza, além da flexibilidade das respostas obtidas, sem perder informações importantes durante a manipulação dos dados (SIMÕES; SHAW, 2007).

2.6.1 Conjuntos Fuzzy e Funções de Pertinência

Os conjuntos *fuzzy* não possuem fronteiras bem definidas e surgiram em decorrência das limitações dos conjuntos clássicos para lidar com problemas onde as transições de

uma classe para outra acontecem de forma suave. Um conjunto *fuzzy* é um agrupamento impreciso e indefinido, onde a transição de não pertinência para pertinência é gradual e não abrupta (SIMÕES; SHAW, 2007).

A definição, propriedades e operações dos conjuntos *fuzzy* são obtidas da generalização da teoria de conjuntos clássica. Nesta, a pertinência de um elemento x em um conjunto A é dada por $x \in A$, conforme descrito na Equação 15. A função $\mu_A(x)$ é chamada função de pertinência e o seu valor indica se o elemento x pertence ou não ao conjunto A (ORTEGA, 2001).

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (15)$$

No contexto da lógica *fuzzy*, um elemento pode ser parcialmente membro de um conjunto, indicado por um valor dentro de um intervalo numérico. O quanto que um dado elemento x pertence a um conjunto A é chamado de grau de pertinência, sendo representado pela sua respectiva função de pertinência.

A função de pertinência tem todos os valores dentro do intervalo $[0,1]$ e fornece o grau de relacionamento do elemento e não apenas a relação pertence e não pertence. Portanto, quanto mais próximo seja $\mu_A(x)$ de 1, mais x pertencerá a A . Considerando A um subconjunto de U (conjunto universo), A é caracterizado por um conjunto de pares ordenados dados pela Equação 16.

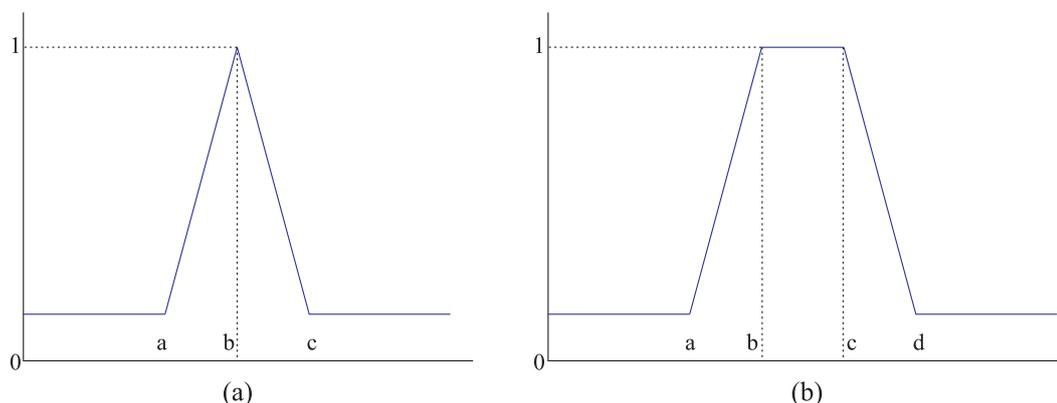
$$A = \{(x, \mu_A(x)), x \in U\}. \quad (16)$$

As funções de pertinência também são conhecidas como função de relacionamento e podem ser caracterizadas de várias formas, como: linear por partes (trapezoidal ou triangular), quadrática, gaussiana, etc. Nos problemas de engenharia, as funções lineares por partes são as mais utilizadas devido a sua simplicidade e o esforço computacional exigido pelos outros tipos de funções não refletirem em uma melhora significativa na qualidade dos valores de saída dos sistemas (ORTEGA, 2001). Nesta Tese, foram utilizadas as funções de pertinência triangular e trapezoidal, apresentadas na Figura 10, e definidas pelas Equações 17 e 18, respectivamente.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a, \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{se } a < x \leq b, \\ \frac{c-x}{c-b}, & \text{se } b < x \leq c, \\ 0, & \text{se } x > c. \end{cases} \quad (17)$$

Sendo: a , b e c o conjunto de três valores que caracterizam as funções de pertinência triangulares da Figura 10(a); em que a e c determinam o intervalo dentro do qual a

Figura 10 – Função de pertinência: (a) Triangular (b) Trapezoidal.



Fonte: Autoria própria.

função de pertinência assume valores diferentes de zero e b em que a pertinência é máxima e igual a 1.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq a, \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{se } a < x \leq b, \\ 1, & \text{se } b < x \leq c, \\ \frac{d-x}{d-c}, & \text{se } c < x \leq d, \\ 0, & \text{if } x > d. \end{cases} \quad (18)$$

Sendo: a, b, c e d o conjunto de quatro valores que caracterizam as funções de pertinência trapezoidal da Figura 10(b); 10(b); em que a e d determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência assume valores diferentes de zero e b e c determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência é máxima e igual a 1.

A representação trapezoidal caracteriza-se por mapear as funções de pertinência nos extremos, enquanto as triangulares mapeiam as outras variáveis em pequenas regiões, porém bem definidas.

Representando cada uma das funções de pertinência, têm-se as variáveis linguísticas, onde cada termo tem a ele associado um conjunto *fuzzy* que o caracteriza. Para exemplificar, as variáveis linguísticas da temperatura do corpo de uma pessoa que está com febre podem ser: baixa, média e alta. Na formulação clássica, os termos linguísticos atribuídos para febre seriam: ausente e presente.

2.6.2 Operações entre Conjuntos *Fuzzy*

2.6.2.1 União

Seja E o universo de discurso, $x \in E$, $M = [0,1]$ e os conjuntos *fuzzy* $A \subset E$, $B \subset E$. A união é o contorno que inclui ambos os conjuntos *fuzzy* e, portanto, é sempre maior que qualquer um dos conjuntos individuais A e B. Então, o vetor de pertinência de união

é calculado dos valores individuais de A e B, conforme Equação 19 (SIMÕES; SHAW, 2007).

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max [\mu_A(x), \mu_B(x)]. \quad (19)$$

2.6.2.2 Intersecção

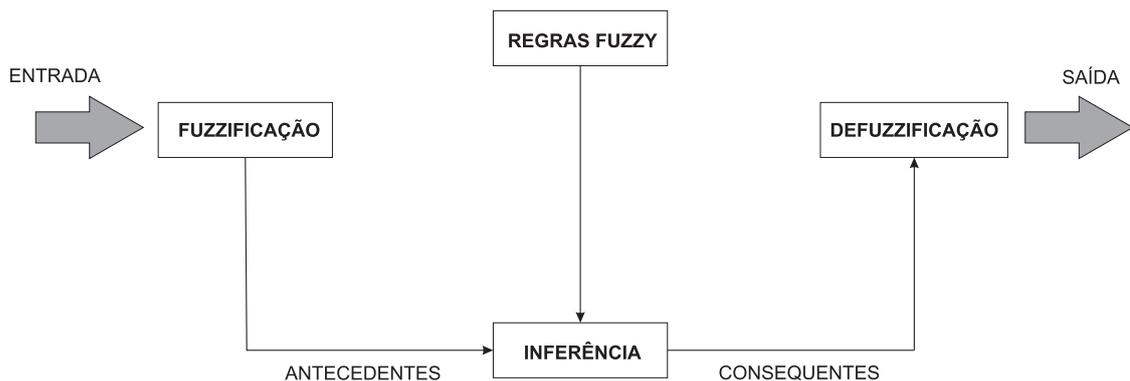
Seja E o universo de discurso, $x \in E$, $M = [0,1]$ e os conjuntos *fuzzy* $A \subset E$, $B \subset E$. A intersecção é a parte comum dos conjuntos A e B e é sempre menor que qualquer um dos conjuntos individuais A e B. Por esta razão, o vetor de pertinência da intersecção $A \cap B$ pode ser calculado dos valores individuais de A e B, conforme Equação 20 (SIMÕES; SHAW, 2007).

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min [\mu_A(x), \mu_B(x)]. \quad (20)$$

2.6.3 Sistema Lógico *Fuzzy*

O sistema lógico *fuzzy* é um conjunto de métodos baseados no conceito de conjunto difuso e operações difusas, o qual possibilita uma modelagem mais realista e flexível de sistemas. O processo de construção de um sistema *fuzzy* é resumido na Figura 11, sendo composto por três etapas. Inicialmente, há a fuzzificação do espaço de entrada, via uso de funções de pertinência. A etapa do procedimento de inferência é realizada mediante a consulta das regras *fuzzy*, combinando graus de pertinência para formar as variáveis de saída. A última etapa é a defuzzificação, que também faz uso de funções de pertinência para obter a variável de saída.

Figura 11 – Estrutura básica de um sistema *fuzzy*.



Fonte: Autoria própria.

- **Fuzzificação**

A primeira etapa do raciocínio *fuzzy* é a fuzzificação, na qual se consideram como entradas dados precisos, resultantes de medições ou observações. A fuzzificação consiste em um mapeamento do domínio dos números reais para o domínio *fuzzy*, a

partir do cálculo de um valor para representar o grau de pertinência de um espaço de entrada em um ou mais conjuntos *fuzzy*. Na etapa de fuzzificação é realizada a tradução dos termos linguísticos, isto é, valores qualitativos são transformados em quantitativos.

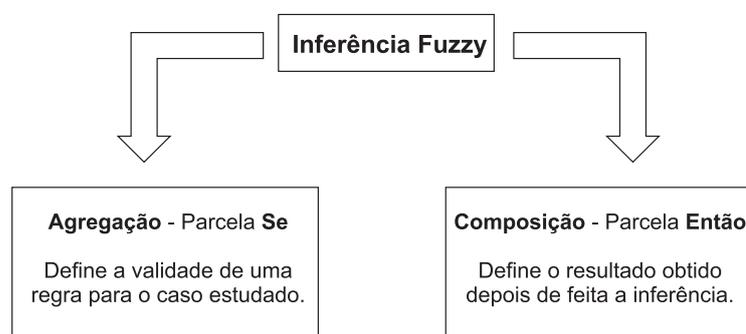
- **Regras Fuzzy**

As regras *fuzzy* descrevem situações específicas que podem ser submetidas à análise e cuja inferência nos conduz a algum resultado desejado. Cada regra *fuzzy* é composta por uma parte antecedente (a parte Se) e uma parte consequente (a parte Então), resultando em uma estrutura do tipo: "Se *antecedentes* Então *consequentes*". Os antecedentes e consequentes são definidos por meio de funções de pertinência e descrevem variáveis de entrada e saída do sistema, respectivamente. Estes componentes definem o processo de inferência lógica *fuzzy*, controlando as relações entre variáveis linguísticas por meio de seus respectivos operadores lógicos.

- **Inferência**

A etapa de inferência é o momento em que serão criadas as regras ou proposições em função da associação das variáveis já definidas. Esta fase tem por finalidade relacionar as possíveis variáveis entre si, por meio de regras pré-estabelecidas, podendo ser dividida em dois componentes: agregação e composição, conforme ilustrado na Figura 12 (JANÉ, 2004). Da inferência resulta um conjunto difuso, o qual será convertido em escalar (valor condensado ou defuzzificado), fornecendo a saída do sistema. A inferência mais comum e amplamente utilizada no controle de sistemas é o Método de Mamdani, o qual é apropriado para a aplicação de sistemas de apoio a tomada de decisão (HAMAM; GEORGANAS, 2008).

Figura 12 – Inferência *fuzzy*.



Fonte: JANÉ (2004).

- **Defuzzificação**

Nesta etapa o valor da variável linguística de saída inferida pelas regras *fuzzy* será convertido em um número. Portanto, a defuzzificação é uma transformação inversa

que traduz a saída do domínio *fuzzy* para o domínio discreto. Há na literatura algumas técnicas de defuzzificação, onde a seleção de uma delas é dependente da aplicação em desenvolvimento. Nesta Tese propõe-se o uso do método Centróide, que se adapta melhor ao problema da coordenação de sobrecorrente, pois permite obter um sinal de saída mais suave e todas as funções de pertinência utilizadas se sobrepõem. Neste método, o valor numérico obtido representa o centro de gravidade de distribuição de possibilidade de saída do sistema *fuzzy* (KUMAR *et al.*, 2016).

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, apresentaram-se os fundamentos teóricos sobre o SDEE e os elementos que o compõe. Desses, o foco foram os relés de sobrecorrente (função 51), fusíveis e religadores, apresentando seu princípio de funcionamento e a formulação matemática para realizar a coordenação da proteção. Também foram apresentados os conceitos sobre GD e os fundamentos sobre os sistemas fotovoltaicos. Discutiram-se ainda os impactos decorrentes da instalação da GD na proteção dos SDEE. O capítulo foi concluído com a apresentação dos fundamentos da PA e da lógica *fuzzy*, técnica que será aplicada para realizar a coordenação do sistema de proteção.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta um resumo da etapa de análise do estado da arte referente ao tema da pesquisa, a qual foi dividida em três seções: i) a primeira seção apresenta uma análise dos trabalhos que tratam dos impactos da inserção da GD na proteção dos SDEE; ii) a segunda seção contém os trabalhos relacionados com PA e iii) a terceira seção discute os trabalhos selecionados que aplicam lógica *fuzzy* na coordenação da proteção de sobrecorrente. Algumas considerações são realizadas no término do capítulo, de forma a estabelecer uma visão geral do estado da arte, contextualizar a abordagem proposta e evidenciar a contribuição desta pesquisa.

3.1 IMPACTOS DA INSERÇÃO DA GD NA PROTEÇÃO DO SDEE

O primeiro registro de GD na Agência Nacional de Energia Elétrica ocorreu em junho de 2007, a partir da utilização dos GFV com capacidade de 0,5 kW. Entre a primeira instalação e a Resolução Normativa 482 (REN 482), que autorizava a geração a partir de fontes renováveis, haviam apenas 14 unidades instaladas no Brasil, que totalizavam 452 kW, representando um crescimento médio de 90,4 kW por ano. Após a publicação da Resolução Normativa 687 em novembro de 2015, que revisou a REN 482 com o objetivo de reduzir os custos e o tempo para a conexão, aumentar o público alvo e melhorar as informações na fatura, tem-se hoje uma capacidade instalada de GFV de 14.219 MW, representando 6,3% da matriz energética brasileira (ONS, 2024).

Neste contexto, conforme apresentado no capítulo anterior, a evolução topológica dos SDEE com GD e a capacidade de ilhamento das microrredes resultaram em mudanças no valor e na direção das correntes de curto-circuito e de carga, que podem comprometer a confiabilidade do sistema de proteção em função da perda de seletividade, sensibilidade e velocidade de atuação da proteção, sendo por isso objeto de estudo nos últimos anos. Dentre os vários trabalhos disponíveis na literatura especializada que estudam os impactos provocados pela inserção da GD no sistema de proteção, selecionaram-se para análise os listados a seguir.

A coordenação entre fusível e religador na presença da GD foi discutida por GIRGIS e BRAHMA (2001). Neste trabalho, os dispositivos de proteção foram coordenados para uma falta em um ramal lateral, inicialmente sem GD. Contudo, para uma falta em um ramal lateral de um sistema com GD resultou em perda de coordenação da proteção. Os autores propuseram métodos que exigem a troca dos religadores originais por disposi-

tivos microcontrolados. A partir dos resultados obtidos, os autores constataram que os impactos da GD dependem do seu tamanho, tipo e localização. Destaca-se como solução inerente aos impactos da GD na proteção de sobrecorrente desconectar as fontes de GD à jusante do religador antes de ocorrer a atuação do religador em sua curva rápida. Essa prática não é recomendada, pois desconectar todas as GD do SDEE sempre que uma falta temporária ocorrer reduzirá consideravelmente a confiabilidade do sistema. Portanto, o método proposto tem sua eficácia comprometida, sendo necessário reavaliar seu desempenho com estudos que impeçam que ocorra a desconexão da GD.

BRAHMA e GIRGIS (2002) utilizaram religadores microprocessados para permitir a coordenação religador - elo fusível em SDEE com GD. Uma margem de coordenação entre os dispositivos foi considerada, sendo necessária a flexibilidade na escolha das curvas de operação do religador. Para validar o método proposto, utilizou-se um sistema com até 200% de inserção de GD, onde foi comprovada a impossibilidade de utilizar religadores tradicionais para coordenação entre os dispositivos de proteção em sistemas com GD. Um método para escolher as curvas de religadores para conseguir uma coordenação também foi indicado neste trabalho. Problemas relacionados à dinâmica do sistema proposto e a realização de cálculos de forma *online* são lacunas observadas neste trabalho.

BRITTO *et al.* (2004) analisaram aspectos relacionados a conexão da GD em sistemas radiais e seus impactos sobre a coordenação de proteção. Para isso, os autores desenvolveram um *software* chamado *Simulator of Distribution Systems with Distributed Generation* (SiGDist), o qual calcula o fluxo de potência, a corrente de curto-circuito e verifica a coordenação da proteção, observando se a proteção principal continua atuando antes da proteção de retaguarda, após haver inserção da GD. Outro *software* foi utilizado para determinar os possíveis efeitos da conexão de uma GD a um alimentador existente em termos de proteção e coordenação. Não considerar mudanças topológicas e atualização dos ajustes dos dispositivos microprocessados compromete o desempenho do método proposto.

VIAWAN *et al.* (2006) propuseram um esquema de proteção para mitigar os problemas decorrentes do impacto da alta inserção da GD na coordenação da proteção. Os autores constataram que a presença da GD torna os SDEE não radiais, de modo que o esquema de proteção perde sua eficácia e a coordenação da proteção pode não ser realizada, diminuindo a confiabilidade do SDEE. O esquema de proteção proposto neste trabalho buscou garantir que os dispositivos convencionais de proteção de sobrecorrente (relé de sobrecorrente, religadores e fusíveis) não percam suas funções e sua devida coordenação. Para isso, a ideia dos autores consistiu em conectar os geradores distribuídos a dois alimentadores para operarem em *loop* e o esquema proposto foi dividido em três etapas: i) interromper o *loop* para isolar a GD da área com falta e colocar o alimentador

com falta em operação radial; ii) eliminar a falta e iii) colocar os alimentadores de volta à operação em malha no caso da ocorrência de uma falta temporária. Para execução correta dessas etapas, deve-se utilizar um relé de proteção de alta velocidade baseado em microprocessador, o qual é normalmente utilizado para proteção de sistemas de transmissão. Apesar desse esquema evitar o desligamento desnecessário da GD, tornando o SDEE confiável, seu desempenho dinâmico poderá ser afetado, caso a duração da falta seja prolongada. Portanto, o problema relacionado à dinâmica do sistema deve ser investigado visando garantir a confiabilidade do sistema de proteção proposto.

O estudo dos efeitos da GD na coordenação entre relés foi estudado também por LU *et al.* (2007), onde os autores concluíram que o problema da falta de coordenação decorrente da GD pode ser resolvido aplicando uma proteção de sobrecorrente inversa ou proteção direcional. A análise dos resultados mostrou que o tempo de atuação do relé é pequeno para faltas à jusante da GD e que há possibilidade de ocorrer falha na atuação para faltas à montante, em função da capacidade, quantidade e potência da GD instalada.

Um método para determinar um limiar aceitável para a inserção de GD visando garantir a manutenção da coordenação entre religador e fusível foi proposto por CHAI-TUSANEY e YOKOYAMA (2008), cujo objetivo principal foi maximizar a potência gerada pela GD a partir de restrições de fluxo de potência, onde a potência da SE e da GD devem ser menores que os limites estabelecidos para cada uma, respectivamente. Essas restrições de proteção estão relacionadas à manutenção do valor das correntes de falta submetidas aos dispositivos de proteção (relé, religador e fusível) dentro do intervalo considerado aceitável. Ao tentar determinar o limiar para a inserção da GD sem considerar que o SDEE está sujeito à sofrer mudanças topológicas e variações no carregamento acarreta em uma limitação do método proposto pelos autores.

KHEDERZADEH *et al.* (2010) apresentaram um estudo com diferentes tipos de GD visando avaliar os impactos no sistema de proteção, como: fluxo de potência reverso, ilhamento e religamento automático e coordenação dos relés de sobrecorrente. Tais problemas ocorrem porque os SDEE costumam ser planejados como redes passivas, isto é, nenhuma geração é esperada no sistema. Neste trabalho, o problema de coordenação do relé na presença de unidades de GD foi analisado utilizando três tipos diferentes de geradores: síncrono, assíncrono e de indução com alimentação dupla. As análises foram realizadas com um sistema de 30 barras disponibilizado pelo *Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)*, o qual possui dois níveis de tensão, optando-se por inserir a GD no nível de tensão mais baixo. Dentre os geradores analisados, os autores concluíram que o gerador síncrono mostrou-se mais severo para o sistema de proteção e a solução apresentada para manter a coordenação do relé de sobrecorrente foi aplicar limitadores de corrente de falta, os quais obtiveram desempenho satisfatório independentemente

do tamanho e tipo do gerador distribuído. Os autores concentraram os estudos apenas nos relés, não considerando os fusíveis e religadores, os quais são de fundamental importância para o SDEE manter a continuidade do serviço.

SHERBILLA *et al.* (2011) propuseram uma configuração prática e versátil para elementos de proteção de sobrecorrente em SDEE com quantidades consideráveis de geradores distribuídos conectados, uma vez que a utilização desses geradores pode acarretar na falta de coordenação ou operação inadequada dos relés de sobrecorrente presentes no sistema. Um SDEE real foi utilizado na etapa de simulação a fim de avaliar o impacto do GFV nas correntes medidas durante a ocorrência de um curto-circuito. Além disso, as características típicas do SDEE e os diferentes tamanhos e localizações de GFV foram considerados. Ao final, os autores informaram que a configuração proposta resultou em um melhor esquema de coordenação. Além disso, segundo os autores, menores tempos de eliminação dos curtos-circuitos foram obtidos, além de uma seletividade otimizada para relés de sobrecorrente a partir da variação dos locais e tamanho dos geradores distribuídos utilizados. A proposta apresentada nesse trabalho tem como vantagem não necessitar de investimentos, isto é, os relés que já estão em operação são capazes de proteger o SDEE mesmo havendo entrada de novas fontes de energia. No entanto, faz-se necessário um estudo mais aprofundado se a inserção da GD acarreta em perda de coordenação entre os fusíveis e religadores.

Um índice para avaliação quantitativa da descoordenação da proteção dos sistema de distribuição com a presença de GD foi apresentado por PHOLBORISUT *et al.* (2011). A partir desse índice, os autores avaliaram a capacidade máxima permitida de GD que poderão ser inseridos no SDEE, de modo a manter a coordenação da proteção. A análise dos resultados apresentou que a localização e a potência dos GD têm impacto no valor do índice de descoordenação e, de forma geral, quanto maior o nível de inserção da GD, maior o seu índice e, conseqüentemente, maiores as chances de haver descoordenação. Também neste caso, apenas a coordenação entre religador e fusível foi considerada.

Buscando uma nova abordagem para estudar o impacto da GD na coordenação entre religador e fusível, NAIEM *et al.* (2012) realizaram um processo de avaliação a partir de uma técnica de classificação para determinar os casos onde os curtos-circuitos causam descoordenação, de forma a orientar o operador do sistema de distribuição para tomar uma decisão adequada. Além disso, também foram propostas duas ações complementares: i) busca por melhores locais para instalação da GD, baseado no menor número de casos em que a coordenação foi mantida; ii) modificação das características dos religadores para minimizar os casos de descoordenação. Não considerar atualizações dos ajustes dos dispositivos de forma *online* acaba sendo uma limitação para a proposta apresentada pelos autores sobre a segunda proposta apresentada.

WALT *et al.* (2018) analisaram os desafios do sistema de proteção relacionados à

integração da GD em SDEE. Os autores afirmaram que muitas das pesquisas disponíveis não consideravam os baixos níveis de corrente de falta decorrentes da inserção da GFV, conseqüentemente, a proteção convencional de sobrecorrente não é capaz de proteger o SDEE com GFV. Baseado nesses desafios, alternativas de proteção centralizadas e descentralizadas foram avaliadas. Falso *trip*, *blinding protection* e perda da coordenação foram definidos como principais riscos para correta atuação do sistema de proteção. Como alternativas de proteção, destacaram-se: desconexão da GD, proteção diferencial, atualização das configurações em tempo real, comparação de fase e unidade de proteção em tempo real. Por fim, os autores propuseram que uma alternativa simples e barata que poderia aumentar a confiabilidade e segurança do sistema seria a utilização de relés de sobrecorrente microprocessados por possuírem proteção de sequência negativa. Dada a importância do tema, estudos mais aprofundados levando em consideração as componentes de sequência devem ser realizados, pois este é um fator chave para estudos de faltas no SDEE.

FURLAN *et al.* (2018) analisaram os efeitos causados pela GD em SDEE considerando diferentes cenários de operação. O objetivo principal do trabalho consistiu em determinar o ponto ótimo de instalação do GFV no SDEE, visando estabelecer a melhor forma de injetar potência ativa no SDEE, além de reduzir as perdas de energia e proporcionar melhoria do perfil de tensão. Para isso, o sistema IEEE 13 barras foi modelado em um simulador digital em tempo real com uma usina solar fotovoltaica conectada. Ao final, os autores confirmaram que a alocação ótima do GFV contribuiu com a redução das perdas elétricas do sistema-teste. Além disso, evidenciou-se a importância da realização de um estudo prévio para a conexão da GD, a fim de otimizar sua conexão ao SDEE, visando garantir a continuidade do serviço.

VARGAS *et al.* (2018) avaliaram os impactos da elevada inserção de GFV na proteção de sobrecorrente em um SDEE variando o tipo e a localização dos curtos-circuitos em relação aos elementos de proteção. Para a etapa de simulação, o GFV, o sistema-teste IEEE 13 barras e a proteção de sobrecorrente foram modelados no *software* Simulink (MATLAB®). Com isso, simularam-se todas as combinações de conexão e desconexão dos GFV inseridos no SDEE para dois pontos de curtos-circuitos distintos: uma mais próxima e outra mais distante da SE. Foram analisados dois tipos de curtos-circuitos: trifásico e monofásico, para cada fase do alimentador, além de medir as correntes dos relés de sobrecorrente. Os autores concluíram que o GFV promoveu uma variação relevante na corrente de falta medida por cada relé de sobrecorrente e que essa variação aumenta à medida que a falta se distancia da SE. Os resultados para os casos avaliados indicam que há uma tendência na geração de problema na coordenação da proteção, de modo que ajustes na proteção de sobrecorrente devem ser estudados para mitigar os possíveis impactos que possam comprometer a confiabilidade da proteção do

SDEE, decorrentes da operação descentralizada dos GFV de pequeno porte.

LEITE *et al.* (2020) analisaram as contribuições das correntes de curto-circuito a partir da comparação da GFV ausente ou presente. O principal objetivo do trabalho foi observar a contribuição da GD na corrente de curto-circuito e, como consequência, a possível redução da sensibilidade da sua proteção por sobrecorrente. O estudo foi conduzido mediante aplicações de situações de curtos-circuitos nos barramentos do SDEE, a fim de avaliar o desempenho das correntes nos terminais dos geradores e, conseqüentemente, das consideradas pelo sistema de proteção. Diante dos resultados obtidos a partir das simulações realizadas no sistema-teste CIGRE 14 barras, os autores constataram que de fato, a inserção de um GFV impacta nas grandezas de saída, sendo esta influência mais severa nas correntes de fase durante as faltas monofásicas. Por fim, foram destacadas possíveis soluções que podem ser empregadas para contornar os efeitos da inserção de GFV e garantir uma proteção confiável e segura, como a comunicação entre os dispositivos de proteção e avaliação das componentes simétricas.

FRACALOSSI *et al.* (2020) investigaram a ocorrência da atuação indevida dos dispositivos de proteção em SDEE devido à presença do GFV, denominada *trip* solidário. Caso o SDEE possua elevada presença de GD, a contribuição da corrente dessa nova fonte de energia fará com que os relés, religadores, disjuntores e fusíveis atuem de forma equivocada, podendo ilhar parte do sistema que não apresenta falhas. Diante dessa problemática, modelou-se o sistema IEEE 13 barras para pesquisar de forma específica e identificar os principais fatores intensificadores do impacto do GFV nos dispositivos de proteção, especialmente nos fusíveis e religadores. A partir das simulações realizadas, constatou-se que nem sempre ocorre uma relação diretamente proporcional entre a variação da potência ativa fornecida pelos GFV com a ocorrência do *trip* solidário, pois em alguns casos em que ocorreu menor entrega de potência ativa, foram observados maiores níveis de correntes à jusante da conexão. Os autores também comprovaram a contribuição das GD nas correntes do ramal principal na ocorrência de um curto-circuito e a ocorrência de *trip* solidário em ramais laterais com conexão de GD, possuindo valores superiores a 200%, o que sugere atuação indevida dos dispositivos de proteção. Uma proposta de readequação da proteção do sistema-teste apresentada foi a substituição do fusível responsável pela proteção do ramal lateral com conexão de GD por um relé de sobrecorrente direcional, pois a contribuição da corrente de curto-circuito do GFV para o ponto de falta no sentido reverso do elemento de proteção direcional não o faria atuar, evitando o *trip* solidário.

MENDES *et al.* (2021) avaliaram diferentes cenários em regime permanente de um SDEE com elevada inserção de GD. Os autores optaram por monitorar os valores da corrente de carga para avaliar os impactos quantitativos e qualitativos nos dispositivos de proteção já instalados e parametrizados no SDEE. Assim, a partir do sistema IEEE 13

barras e considerando diferentes combinações de localizações topológicas e quantidades de GFV instalados no SDEE, constatou-se que a maioria dos casos simulados resultaram em correntes de carga menores, havendo situações em que essa redução foi de mais de 80% do valor da corrente. Essas reduções nos valores da corrente de carga podem acarretar em falhas no *trip* do relé de sobrecorrente. Com isso, deve-se haver alterações nos ajustes dos dispositivos de proteção de sobrecorrente quando há inserção massiva de GFV, a fim de garantir a sensibilidade dos dispositivos e seu correto funcionamento.

Nos trabalhos de ALAM *et al.* (2018), YOUSAF *et al.* (2022a) e YOUSAF *et al.* (2022b) foram utilizados arranjos fusíveis-religadores para proteger os SDEE radiais. Uma estratégia de coordenação de proteção baseada em religadores para a configuração de um esquema *save-fuse* no SDEE foi apresentada em YOUSAF *et al.* (2022a). Esse método fornece uma faixa de coordenação flexível junto com configurações de proteção mais precisas. O arranjo religador-fusível descrito destina-se a proteger apenas um sistema radial de topologia fixa. Uma análise abrangente dos impactos da GD no desempenho da proteção do SDEE foi apresentada em YOUSAF *et al.* (2022b). No trabalho, foram realizados vários estudos de caso de coordenação de proteção em diferentes condições de operação. Os riscos na proteção são examinados para a coordenação mútua dos relés de sobrecorrente, religadores e fusíveis, porém nenhuma solução é dada para manter a coordenação da proteção na presença da GD.

3.2 PROTEÇÃO ADAPTATIVA

A PA é uma filosofia de proteção que permite e procura fazer ajustes nas várias funções de proteção, de acordo com as condições predominantes do sistema, visando manter a coordenação dos seus dispositivos em relação às modificações ocorridas no SDEE. De acordo com ABDELAZIZ *et al.* (2001), o sistema de proteção pode ser adequadamente ajustado em resposta às alterações causadas pela geração intermitente da GD, como: i) alterações nos níveis de carga; ii) alterações nos níveis de geração e iii) alterações na topologia do SDEE. Nesse contexto, apresentam-se a seguir os trabalhos mais relevantes para o desenvolvimento desta Tese.

BRAHMA e GIRGIS (2004) propuseram um método de PA em que o SDEE é dividido em zonas independentes, onde os limites de cada área são definidos por disjuntores. Ao ser implementado em um relé situado na SE, este método é capaz de monitorar as correntes observadas nas áreas de proteção que contêm GD e se comunicar com outros dispositivos de proteção. O relé identifica a área com defeito e a isola, comparando as medições *offline* das correntes originadas do defeito e da GD em tempo real. Contudo, embora seja eficaz na proteção do SDEE contra os impactos da GD, o método sugerido exige valores sincronizados das correntes medidas, o que implica em investimentos no uso de *Global Positioning System* (GPS), bem como medições em todas as barras de carga

e com a inserção da GD, resultando em altos custos financeiros para o SDEE. Além disso, o desempenho do método é influenciado pelo número de geradores distribuídos, onde quanto maior esse número, menor o desempenho. O método também exige a simulação de todos os cenários de defeito possíveis *offline*, o que pode ser impraticável dependendo do tamanho do sistema.

HUSSAIN *et al.* (2013) desenvolveram um esquema adaptativo para garantir o funcionamento da filosofia *fuse-save* em SDEE com GD. A depender do nível de inserção de GD no SDEE, sugeriu-se a substituição dos religadores já instalados e coordenados por religadores microprocessados com função de comunicação. Os autores também propuseram um algoritmo para a alteração *online* de I_p do religador em resposta à diferentes cenários de inserção de GD, pois não havia garantia de funcionamento do método proposto para diferentes níveis de GD para I_p fixa.

SOUZA JR. (2016) apresentou um sistema de PA com arquitetura distribuída que torna automática a obtenção dos ajustes de coordenação de relés de sobrecorrente instantânea para SDEE, ou seja, sem a necessidade de intervenção humana e nem a interrupção do fornecimento de energia elétrica ou do monitoramento do sistema. O método proposto utilizou a corrente de carga como item principal para a determinação dos ajustes das unidades instantâneas de sobrecorrente em SDEE de média tensão com e sem a presença de GD. Os resultados obtidos para o SDEE sem GD foram de acordo com os resultados esperados, enquanto que na presença da GD, verificou-se que o sistema de PA proposto apresentou desempenho superior que o sistema baseado nas técnicas tradicionais. Os resultados obtidos comprovaram a viabilidade técnica da metodologia proposta e a etapa da realização dos cálculos *online* dos equivalentes de rede garantem a confiabilidade para a realização dos estudos de coordenação e seletividade, sendo essa uma vantagem apresentada neste trabalho.

SILVA *et al.* (2018) propuseram um esquema de PA para mitigar os impactos da GD e realizar a reconfiguração topológica do sistema de proteção. O sistema adaptativo proposto é ativado mediante mudança topológica da rede elétrica, mudança no nível de corrente e conexão/desconexão de GD, sendo capaz de alterar os grupos de configuração dos relés, bem como calcular e enviar aos relés uma nova configuração, por meio de um protocolo *Telnet*. Quando ativado, a PA testa a coordenação de cada relé da rede, buscando o grupo de ajuste que garanta a coordenação do sistema de proteção e, caso não seja encontrado um grupo de ajuste que satisfaça a coordenação com os demais relés, novos ajustes são calculados e enviados aos relés. Portanto, esta estratégia permite cobrir uma maior quantidade de cenários de operação do SDEE, garantindo uma maior flexibilidade com confiabilidade ao sistema de proteção. Após validação a partir do modelo computacional de um sistema elétrico real, os resultados obtidos no estudo de caso mostraram que a PA melhorou a seletividade e a confiabilidade do sistema de

proteção, em virtude de permitir a adequação dos ajustes dos relés de proteção. Em um sistema de proteção convencional, com ajustes fixos, isto não seria possível.

KUMAR *et al.* (2018) apresentaram um esquema de PA tendo como base a coordenação de relés de sobrecorrente direcionais em SDEE malhados considerando a presença de GD. Os autores propuseram um relé de sobrecorrente direcional adaptativo como uma alternativa aos tradicionais relés de sobrecorrente, em virtude destes não serem adequados para proteger os SDEE com GD e as mudanças nas arquiteturas do sistema. O esquema proposto consiste em uma abordagem em duas etapas: i) configuração de corrente ótima com base na relação entre a potência de saída da GD e a respectiva tensão do alimentador, a partir de um módulo de decisão com lógica *fuzzy* e ii) configuração ótima do tempo de atuação por meio de um algoritmo de otimização. As configurações ótimas obtidas para o relé são alcançadas independentemente do tipo, localização e tamanho da GD, sendo esta uma vantagem do esquema proposto.

SHIH *et al.* (2019) propuseram um esquema de PA que explora os recursos avançados das *smart grids*. O esquema proposto realiza automaticamente o ajuste dos relés de sobrecorrente considerando diferentes topologias e condições de operação dos SDEE, onde para qualquer mudança no SDEE, os cálculos são realizados novamente e novas configurações são enviadas para os relés de sobrecorrente. Para isso, necessita de uma unidade de processamento central e tecnologias de comunicação para enviar e receber dados entre os relés e o SDEE. Para coordenar os relés de sobrecorrente, foi utilizado como método de otimização o algoritmo de evolução diferencial. O esquema proposto apresentou resultados satisfatórios e foi considerado robusto para intermitência da GD e as várias condições de operação de contingência do SDEE.

NASCIMENTO (2020) desenvolveu um novo sistema de proteção de sobrecorrente direcional adaptativa para SDEE com a presença de GD. O sistema desenvolvido possui arquitetura centralizada e supervisiona o estado do sistema elétrico por meio do monitoramento e processamento dos canais analógicos e digitais dos relés, obtendo como resultado a variação dos estados dos disjuntores e a potência ativa dos geradores distribuídos. O monitoramento destes parâmetros indica mudanças de estado provenientes de faltas e de potência na GD. Caso haja alteração do cenário, o sistema proposto recalcula os ajustes ótimos da proteção de sobrecorrente empregando um algoritmo microgenético. Para fins de validação, o sistema proposto foi avaliado sob a perspectiva de vários cenários operacionais e níveis de inserção de GD. Também se comparou o desempenho do sistema proposto com um sistema de PA baseado em algoritmo genético e o sistema de proteção convencional. Os resultados obtidos foram satisfatórios e a eficácia do sistema proposto foi comprovada tanto em termos de velocidade de processamento quanto em seletividade. Uma lacuna observada no trabalho foi não avaliar o desempenho do sistema proposto considerando a coordenação com outros dispositivos, tais

como fusíveis e religadores, de modo a contemplar os vários equipamentos de proteção existentes nos SDEE.

CONDE e SHIH (2022) apresentaram um esquema de PA centralizada para relés de sobrecorrente direcionais considerando as dinâmicas do sistema, como variações na demanda de carga e mudanças de topologia. O esquema proposto considera a integração da GD e é adequado para diferentes tipos de sistemas, sejam eles radiais ou malhados, e apresenta como vantagens ter a capacidade de determinar a topologia atual a partir do *status* do disjuntor, estabelecer pares de coordenação de proteção, realizar estudos de fluxo de carga e coordenar os relés de sobrecorrente a partir do algoritmo de evolução diferencial para que eles sempre tenham as configurações adequadas para operar em tempo apropriado. Entretanto, a coordenação dos relés a partir do método proposto com religadores e fusíveis não foram avaliadas, sendo esta uma lacuna no trabalho apresentado.

VASCONCELOS *et al.* (2022) desenvolveram um método de PA que utiliza um algoritmo híbrido de otimização para realizar a coordenação de relés de sobrecorrente em SDEE com GD. O algoritmo proposto baseia-se na associação de duas técnicas de inteligência computacional: a lógica *fuzzy*, responsável pelo controle das correntes de ajuste; algoritmo genético, realiza a otimização dos *diais* de tempo e curvas de atuação dos relés. A técnica proposta foi validada a partir da simulação dos sistemas-testes do IEEE 13 barras e 34 barras, onde foram comparadas as respostas obtidas pelo método proposto com outros dois métodos de PA da literatura. A aplicação do método proposto obteve melhores soluções para a maioria dos cenários analisados, melhorando a sensibilidade da proteção e reduzindo os tempos de atuação dos relés.

CHOOBINEH e STOUPIS (2024) apresentaram um método de PA de sobrecorrente em SDEE considerando a presença de GD. O esquema proposto descreve como as configurações de proteção de sobrecorrente são ajustadas para diferentes cenários de falha, inserção de GD e mudanças nas configurações do SDEE. Para isso, foram definidas regras para ajustar dinamicamente as configurações com base nas condições do sistema e nos tipos de falha. O método apresenta as seguintes vantagens: empregar as características de tempo-corrente inversa, operar de forma contínua dentro dos sistemas de automação de SE e poder ser aplicado a qualquer dispositivo de proteção.

3.3 LÓGICA FUZZY NA PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE

A análise da bibliografia especializada revelou a necessidade de se buscar alternativas mitigadoras dos impactos provocados no sistema de proteção dos SDEE decorrentes da inserção da GD. Nesse contexto, dentre as várias propostas disponíveis, destacam-se atualmente os métodos de otimização e inteligência artificial, por exemplo: algoritmos

genéticos, enxame de partículas, evolução diferencial, lógica *fuzzy*, redes neurais artificiais e árvore de decisão. Os trabalhos de ANSARI e BAKAR (2014), MARROUCHI e SABER (2014) e LANGAZANE e SAHA (2024) apresentam uma revisão histórica sobre esses métodos.

Dentre tantas possibilidades, optou-se por utilizar a lógica *fuzzy* nesta Tese para minimizar os problemas na proteção de sobrecorrente decorrentes da inserção da GD em virtude das seguintes razões: i) adaptar dinamicamente os cálculos de coordenação de sobrecorrente a alterações nas cargas do SDEE, alterações na topologia do alimentador ou mesmo falhas em componentes do sistema de proteção; ii) permitir utilizar o conhecimento dos engenheiros de proteção na solução do problema; iii) flexibilidade; iv) não necessitar desenvolver um modelo matemático complexo para o novo problema; v) poder ser utilizada em *hardwares* cujo poder de processamento e de espaço de memória são limitados; vi) não necessitar de comunicação entre os dispositivos, pois as entradas do sistema *fuzzy* são obtidas localmente e vii) incluir quantos níveis forem necessários para modelagem do problema sem resultar em um grande esforço computacional. Todas essas características foram observadas nos trabalhos selecionados e discutidos a seguir.

ABYANE *et al.* (1997) propuseram um novo método para calcular o *dial* de tempo e o tempo de atuação dos relés de sobrecorrente. Como tradicionalmente as características dos relés de sobrecorrente são modeladas a partir de um polinômio obtido usando técnicas de ajuste de curva e, sabendo que essas técnicas apresentam erros significativos, os autores utilizaram redes neurais (responsável na obtenção do TDS) e lógica *fuzzy* (etapa do cálculo do tempo de operação) a fim de minimizá-los. Ambas as técnicas possuem como entrada a curva característica do relé. KUMAR *et al.* (2015) também combinaram lógica *fuzzy* e redes neurais buscando auxiliar o relé de sobrecorrente para decidir as configurações de proteção ótima de acordo com às mudanças no cenário do SDEE em decorrência da instalações da GD. Ambos os trabalhos apresentaram resultados satisfatórios e se mostraram mais velozes e eficientes que os métodos tradicionais.

REBIZANT *et al.* (2005) e CHANDNA *et al.* (2008) propuseram uma nova abordagem para a estabilização da proteção de sobrecorrente baseada em lógica *fuzzy* destinada a linhas aéreas de distribuição de média tensão com religamento automático visando garantir a operação confiável do relé. Nesse caso, a estabilização da proteção deve ocorrer para os alimentadores que podem enfrentar condições de surto após a reenergização da linha. O esquema de proteção *fuzzy* desenvolvido foi testado e comparado com outras abordagens de proteção padrão, tendo como resultado a obtenção de um relé com maior sensibilidade, confiabilidade e mais rápido que as soluções comumente disponíveis.

ABIDIN *et al.* (2009) estudaram a possibilidade de utilizar um controlador com lógica *fuzzy* para determinar a temporização do relé de sobrecorrente tendo como variáveis de entrada e saída o tempo de operação e o intervalo de coordenação entre o

relé principal e o de retaguarda, respectivamente. Os resultados obtidos demonstraram que o relé desenvolvido a partir da metodologia proposta possuiu melhor desempenho e maior velocidade se comparado ao relé de sobrecorrente convencional. Entretanto, os autores destacaram que as funções de pertinência do sistema *fuzzy* precisam ser redefinidas para resolver os problemas de violação da restrição de coordenação que continuaram ocorrendo.

PUJANTARA e ABDILLAH (2012) propuseram um novo método para determinar com maior precisão o tempo de atuação dos relés de sobrecorrente a partir da lógica *fuzzy*, tendo I_p e o *dial* de tempo como variáveis de entrada. Pelos resultados obtidos, os autores constataram uma coordenação mais eficiente e precisa dos relés de sobrecorrente comparado às técnicas convencionais. Outra vantagem observada no estudo foi a realização da configuração da curva inversa do relé de modo mais prático.

MOMESSO *et al.* (2019) propuseram um sistema de PA baseado na lógica *fuzzy*, a qual parametriza as I_p de relés de sobrecorrente com presença de GD do tipo eólico, tendo como variáveis de entrada a corrente de pré-falta e a variação da corrente. Não necessitar de comunicação entre os dispositivos de proteção é uma grande vantagem do método proposto, uma vez que as entradas da lógica *fuzzy* são obtidas localmente. A partir dos resultados obtidos, verificou-se que a aplicação do sistema *fuzzy* tem o potencial de melhorar o desempenho dos relés, modificando dinamicamente suas configurações de acordo com o funcionamento do SDEE. Os autores defenderam que a técnica proposta tem potencial para se tornar uma evolução dos relés convencionais, visto que os relés digitais permitem a programação de diversas técnicas para aprimorar seus desempenhos.

ANGGRIAWAN *et al.* (2019) propuseram a modelagem de uma curva não convencional de sobrecorrente a partir das redes neurais e lógica *fuzzy*, uma vez que uma equação baseada no padrão IEC não pode alterar a forma da curva. Com isso, durante a coordenação, a curva do relé de sobrecorrente pode cruzar com outras curvas, podendo tornar imprecisa a atuação do relé. Os dados de teste criados pelos autores consistiram em duas curvas inversas para representar o sistema de coordenação do relé, tendo a corrente de curto-circuito e o tempo de operação como entrada e saída da técnica utilizada. A partir dos resultados obtidos, os autores constataram que o método proposto forneceu resultados precisos para modelar curvas de relé de sobrecorrente, e que o valor do erro diminui à medida que o número de funções de pertinência da lógica *fuzzy* aumenta.

BARRADAS (2022) desenvolveu um método para estimar de forma *online* as correntes de curto-circuito em SDEE considerando a inserção de GD e adaptação da proteção existente. O método é capaz de obter as correntes de curto-circuito que circulam nos alimentadores do SDEE utilizando dados pré-falta e os parâmetros elétricos da rede. Isso permite a adaptação da proteção antes da ocorrência de um curto-circuito, com base nas Leis de Kirchhoff e usando a lógica *fuzzy* como método de otimização. Os dados

utilizados incluem a impedância do sistema sob análise, a contribuição dos GD durante a falta e a impedância de falta. Os resultados obtidos mostram a robustez do método, pois ele consegue estimar com eficácia as correntes injetadas pelos GD e calcular a variação da corrente de curto-circuito dos alimentadores do SDEE. Foi observado que as I_p dos relés foram atualizadas, permitindo manter a mesma zona de proteção dos relés, sem perda de coordenação e seletividade da proteção. No entanto, o autor não esclareceu o funcionamento da PA e como é realizada a comunicação com os relés.

3.4 SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Uma síntese dos trabalhos analisados neste capítulo é apresentada na Tabela 2. Ao final da revisão bibliográfica, constatou-se que a maioria dos trabalhos relacionados com PA e lógica *fuzzy* desconsideram o uso de religadores e fusíveis e consideram apenas a presença de relés de sobrecorrente. Considerar religadores e fusíveis nas análises é de importância fundamental, visto que esses elementos são bastante efetivos na atuação de curtos-circuitos transitórios, os quais representam cerca de 80% a 90% dos casos nos SDEE (DODIYA *et al.*, 2015). Com o desenvolvimento dos religadores digitais, a tendência é que estes dispositivos passem a ter mais atenção por parte da comunidade científica. Por outro lado, tendo em conta a natureza construtiva dos fusíveis, a coordenação destes com os demais equipamentos pode vir a constituir uma tarefa laboriosa. Como não é possível realizar alterações na sua construção de forma viável, resta aprimorar os demais equipamentos de proteção.

Para uma avaliação mais precisa do desempenho do método proposto na coordenação da proteção de sobrecorrente, deve-se considerar a atuação de religadores e relés. Esses equipamentos, com parâmetros e coordenogramas de curvas distintas, respondem de maneiras diversas às variações na dinâmica do SDEE com GD, o que pode impactar na etapa de parametrização e, conseqüentemente, a eficiência da proteção, ressaltando a importância da adoção de ambos dispositivos.

Análise da pesquisa bibliográfica também evidenciou o interesse crescente dos pesquisadores para o desenvolvimento de uma abordagem combinada que não exija otimização ou treinamento devido a mudança repentina da dinâmica do SDEE com GD. Portanto, deve-se empregar métodos que atualizem os parâmetros de coordenação de sobrecorrente com velocidade e baixo esforço computacional, para atualizar os ajustes dos dispositivos digitais e prever mudanças topológicas no SDEE monitorado.

Visando preencher as lacunas citadas, propõe-se nesta Tese a utilização de lógica *fuzzy* para implementar uma estratégia de PA que visa ajustar automaticamente as funções de proteção às condições operacionais na presença de GFV, de modo a contemplar os três dispositivos de proteção.

Tabela 2 – Síntese bibliográfica.

Autor (ano)	Relé	Fus.	Relig.	Impactos na proteção decorrente da GD	Não requer processo iterativo	Atualização dos ajustes dos dispositivos digitais	Mudanças topológicas do sistema monitorado
ABYANE <i>et al.</i> (1997)	x	-	-	-	x	-	-
GIRGIS e BRAHMA (2001)	-	x	x	x	x	-	-
BRAHMA e GIRGIS (2002)	-	x	x	x	x	-	-
BRAHMA e GIRGIS (2004)	-	x	x	x	x	-	x
BRITTO <i>et al.</i> (2004)	x	x	-	x	x	-	-
REBIZANT <i>et al.</i> (2005)	x	-	-	-	x	-	-
VIAWAN <i>et al.</i> (2006)	x	x	x	x	x	-	-
LU <i>et al.</i> (2007)	x	-	-	x	-	-	-
CHAITUSANEY e YOKOYAMA (2008)	x	x	x	x	x	-	-
CHANDNA <i>et al.</i> (2008)	x	-	-	-	x	-	-
ABIDIN <i>et al.</i> (2009)	x	-	-	-	x	-	-
KHEDERZADEH <i>et al.</i> (2010)	x	-	-	x	x	-	-
SHERBILLA <i>et al.</i> (2011)	x	-	-	x	x	-	-
PHOLBORISUT <i>et al.</i> (2011)	-	x	x	x	x	-	-
NAIEM <i>et al.</i> (2012)	-	x	x	x	x	-	-
PUJANTARA e ABDILLAH (2012)	x	-	-	-	x	x	-
HUSSAIN <i>et al.</i> (2013)	-	x	x	x	-	x	-
KUMAR <i>et al.</i> (2015)	x	-	-	-	-	x	x
SOUZA JR. (2016)	x	-	-	x	-	x	-
SILVA <i>et al.</i> (2018)	x	-	-	x	-	x	x
KUMAR <i>et al.</i> (2018)	x	-	-	x	-	x	-
WALT <i>et al.</i> (2018)	-	x	x	x	x	-	-
FURLAN <i>et al.</i> (2018)	x	-	-	x	x	-	-
VARGAS <i>et al.</i> (2018)	x	-	-	x	x	-	-
ALAM <i>et al.</i> (2018)	-	x	x	x	x	-	-
ANGGRIAWAN <i>et al.</i> (2019)	x	-	-	x	x	-	-
MOMESSO <i>et al.</i> (2019)	x	-	-	x	x	x	-
SHIH <i>et al.</i> (2019)	x	-	-	x	-	x	-
LEITE <i>et al.</i> (2020)	x	-	-	x	x	-	-
FRACALOSSO <i>et al.</i> (2020)	x	x	x	x	x	-	-
NASCIMENTO (2020)	x	-	-	x	-	x	x
MENDES <i>et al.</i> (2021)	x	-	-	x	x	-	-
YOUSAF <i>et al.</i> (2022a)	-	x	x	x	x	-	-
YOUSAF <i>et al.</i> (2022b)	x	x	x	x	x	-	-
CONDE e SHIH (2022)	x	-	-	x	-	x	x
VASCONCELOS <i>et al.</i> (2022)	x	-	-	x	-	x	x
BARRADAS (2022)	x	-	-	x	x	x	-
CHOOBINEH e STOUPIS (2024)	x	-	-	x	-	x	x
MÉTODO PROPOSTO	x	x	x	x	x	x	x

Fonte: Autoria própria.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um resumo da análise do estado da arte referente aos temas tratados nesta Tese foi apresentado. Dentre os muitos trabalhos pesquisados, foram selecionados para análise aqueles considerados mais relevantes para o desenvolvimento da Tese, os quais foram divididos nas seguintes categorias: impactos da inserção da GD na proteção do SDEE, PA e lógica *fuzzy* na proteção de sobrecorrente. Ao final, constatou-se que o uso de lógica *fuzzy* combinado com PA no contexto da GD pode vir a constituir uma contribuição importante para o estado arte, em especial, quando a automação do SDEE tornar-se uma realidade e os avanços tecnológicos possibilitarem o desenvolvimento de processadores de alto desempenho.

O método proposto avalia o impacto da inserção da GD na coordenação da proteção de sobrecorrente, considerando a atuação de relés, religadores e fusíveis. Para isso, utiliza a lógica *Fuzzy*, uma ferramenta que dispensa treinamento, e a PA, responsável por atualizar os ajustes dos dispositivos digitais conforme as variações na dinâmica do SDEE, como mudanças de carregamento e topologia.

SISTEMA PROPOSTO

Neste capítulo apresentam-se as ideias para desenvolvimento do sistema proposto nesta Tese, o qual tem como objetivo principal aplicar um sistema adaptativo com lógica *fuzzy* para coordenar os dispositivos de proteção de um SDEE com a presença de GFV.

4.1 ARQUITETURA DO SISTEMA

O sistema proposto foi denominado de Sistema de Proteção Adaptativa *fuzzy* (SPA_{fuzzy}), cuja arquitetura está representada na Figura 13. Dentre os vários tipos de arquitetura existentes, selecionou-se a arquitetura centralizada, a qual dispõe de um único computador localizado na SE que controla todo o sistema de proteção. Esse tipo de arquitetura mostrou-se viável em sistemas reais, conforme relatado em STARCK *et al.* (2024), FERNÁNDEZ *et al.* (2024), REIS *et al.* (2024), ALVES *et al.* (2024). A integração da GD torna o SDEE mais dinâmico e imprevisível, alterando o fluxo de energia. Isso afeta os ajustes de proteção contra sobrecorrente, principalmente I_p , que depende diretamente das correntes de curto-circuito e de carga. Para lidar com essas incertezas, a lógica *fuzzy* é uma ferramenta eficaz. O SPA_{fuzzy} recalcula automaticamente os valores de I_p por meio da lógica *fuzzy* de forma *online*, buscando manter a coordenação do sistema de proteção com todos os elementos sempre que ocorrer uma mudança de configuração causadas pela GD, conforme apresentado na Figura 14.

4.1.1 Monitoramento dos Canais Digitais

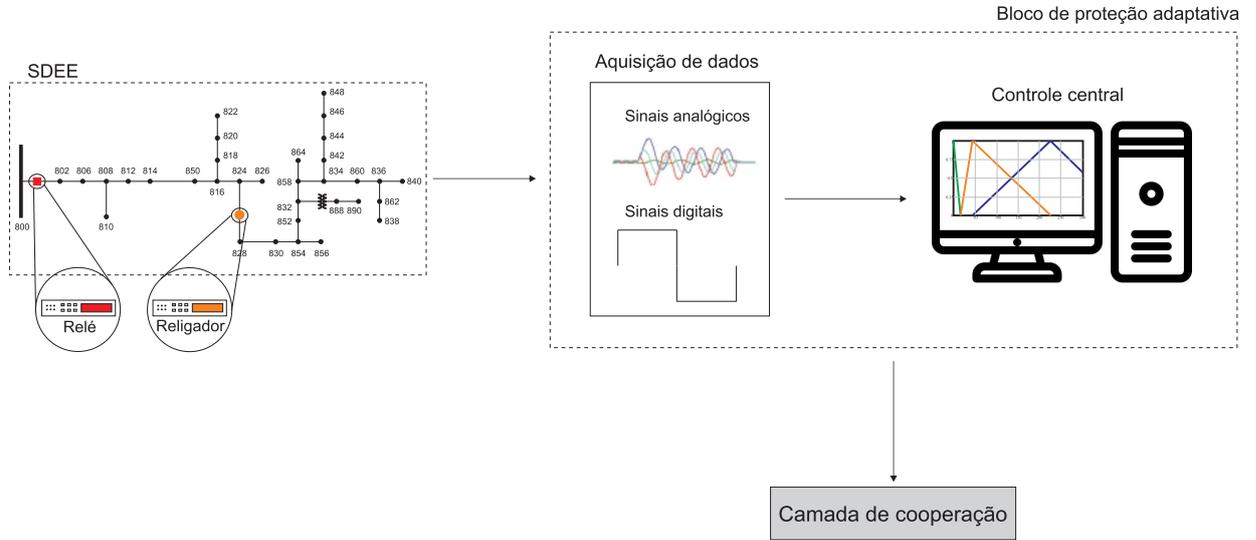
O monitoramento dos canais digitais, o qual é fundamental para a proteção do SDEE, consiste no processamento dos estados dos disjuntores, ou seja, se estão abertos ou fechados. A verificação de qualquer mudança de estado é realizada pelo SPA_{fuzzy}, que segue o procedimento descrito por SOUZA JR. (2016).

Inicialmente, dois *buffers* são responsáveis por armazenar os estados dos disjuntores para dois instantes de tempo, que são o estado do instante atual, $D(k)$, e o estado do instante anterior, $D(k - 1)$. Em seguida, de posse desses dois estados, a verificação do *status* dos disjuntores é realizada aplicando a Equação 21.

$$E_D(k) = D(k) - D(k - 1), \quad (21)$$

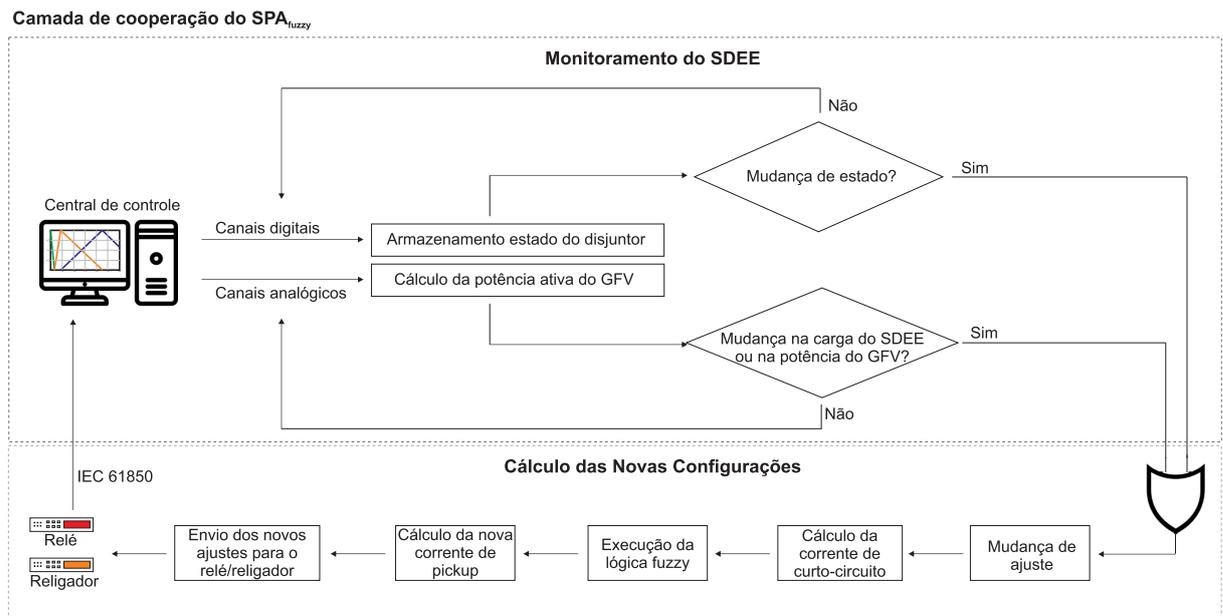
onde $E_D(k)$ representa a variação do estado de todos os disjuntores do SDEE.

Figura 13 – Arquitetura do SPA_{fuzzy}.



Fonte: Autoria própria.

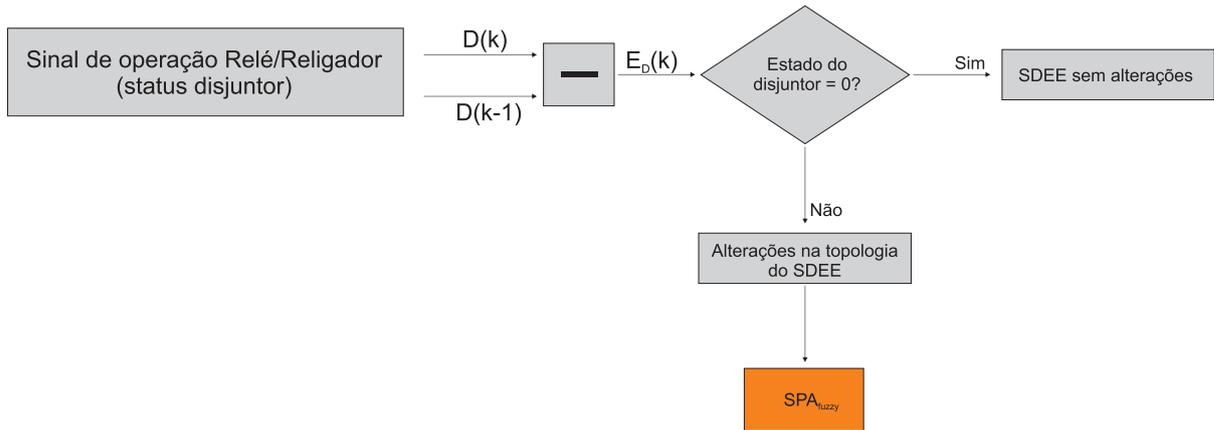
Figura 14 – Fluxograma do SPA_{fuzzy}.



Fonte: Autoria própria.

O resultado da subtração dos estados dos disjuntores igual a zero indica que não ocorreram modificações no SDEE. Entretanto, qualquer que seja a modificação no SDEE, o resultado da Equação 21 será diferente de zero e o SPA_{fuzzy} indica que houve alterações na topologia do sistema e deve recalcular os ajustes de proteção. O fluxograma do monitoramento dos canais digitais está representado na Figura 15.

Figura 15 – Monitoramento dos canais digitais.



Fonte: Autoria própria.

4.1.2 Monitoramento dos Canais Analógicos

O processamento dos canais analógicos envolve a leitura dos sinais de tensão e corrente originados dos religadores e relés digitais. A partir desses sinais, calcula-se o valor da potência ativa, que é uma variável essencial para verificar as condições de operação no SDEE e o intervalo de variação da potência, por meio das Equações 22 e 23 (AKAGI *et al.*, 2017), respectivamente.

$$p(k) = v_a(k)i_a(k) + v_b(k)i_b(k) + v_c(k)i_c(k), \quad (22)$$

$$\Delta P = \frac{p(k) - P_0}{P_0}, \quad (23)$$

sendo: $p(k)$ a potência instantânea; $v_a(k)$, $v_b(k)$ e $v_c(k)$ as tensões nas fases a , b e c , respectivamente; $i_a(k)$, $i_b(k)$ e $i_c(k)$ as correntes nas fases a , b e c , respectivamente; ΔP a variação da potência e P_0 a potência instantânea calculada no início da simulação.

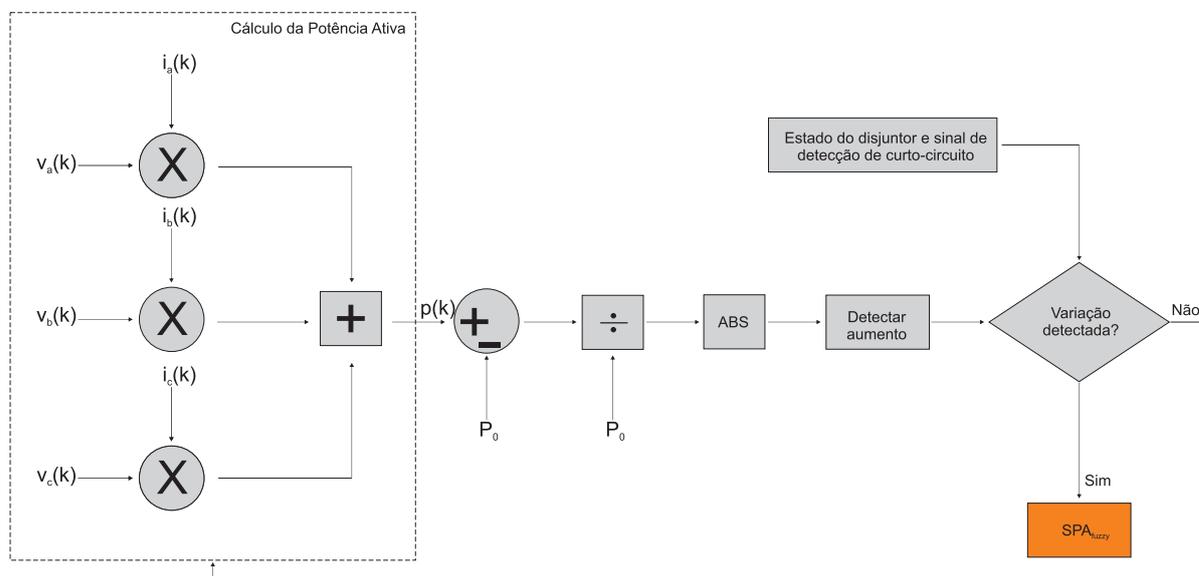
Variações no valor da potência ativa podem indicar mudanças nos cenários de operação do SDEE, tais como: i) alterações no carregamento do sistema, ii) mudanças no nível de inserção da GD ou iii) ilhamento do sistema. Além disso, a potência ativa e ΔP podem indicar o modo de operação do SDEE como normal ou anormal, bem como indicar mudanças no estado do SDEE, de acordo com a Equação 24 (NASCIMENTO, 2020):

$$q \leq \Delta P \leq x, \quad (24)$$

onde q e x são os limites que definem a operação normal do SDEE, os quais são obtidos diretamente a partir dos blocos durante a simulação.

Em caso de violação dos limites superior a 5% (VASCONCELOS *et al.*, 2022), o SPA_{fuzzy} determina que houve uma mudança na operação do SDEE e recalcula a configuração da proteção. Em situações de curto-circuito, ΔP teria uma variação significativa e o SPA_{fuzzy} interpretaria isso como uma alteração no cenário de operação. Para evitar que isso ocorra, o módulo de monitoramento de sinal analógico envia o sinal de detecção de alteração apenas quando ΔP tem variação superior ao limite estabelecido e o relé ou religador não detectaram um curto-circuito (NASCIMENTO, 2020). O fluxograma do monitoramento dos canais analógicos está representado na Figura 16.

Figura 16 – Monitoramento dos canais analógicos.



Fonte: Adaptado de NASCIMENTO (2020).

4.1.3 Cálculo dos Novos Ajustes

Após detectar mudanças na configuração do SDEE, é necessário fazer arranjos apropriados para garantir que o sistema de proteção possa se adaptar a essa nova configuração. O SPA_{fuzzy} deve realizar o cálculo da nova corrente de curto-circuito e, posteriormente, enviar as novas configurações de proteção para os relés e religadores que monitoram o SDEE.

As correntes de carga são obtidas diretamente pelos canais dos dispositivos digitais. Para o cálculo das correntes de curto-circuito, realiza-se análise de Thévenin, uma vez que o método de componentes simétricos não se adequa para o cálculo da corrente de curto-circuito nos SDEE devido a sua natureza desequilibrada. Nesta etapa, o cálculo da corrente de curto-circuito é realizado a partir das Equações 25, 26 e 27

(SHORT, 2004) e o fluxograma apresentado na Figura 17.

$$[Z_{EQ}] = [Z_{TOT}] + [Z_F], \quad (25)$$

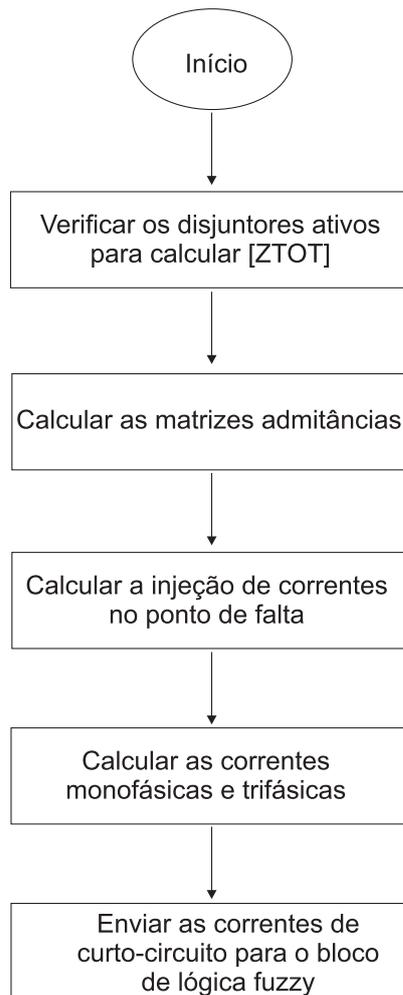
$$[Y] = [Z_{EQ}]^{-1}, \quad (26)$$

$$[I_{P_{abc}}] = [Y] \cdot [E_{abc}], \quad (27)$$

onde: $[Z_{EQ}]$ é a matriz impedância de fase equivalente de Thévenin no ponto de falta e $[Z_{TOT}]$ é a matriz impedância equivalente total do sistema (esses valores são obtidos dinamicamente via blocos do *software* e calculados a partir da programação em linha de código); $[Z_F]$ é a matriz impedância de falta equivalente; $[Y]$ é a matriz admitância equivalente do sistema; $[I_{P_{abc}}]$ é a matriz de injeção de correntes no ponto de falta e $[E_{abc}]$ é o vetor de tensões equivalente Thévenin do sistema.

A partir do fluxograma, com a informação dos estados dos disjuntores verifica-se quais dos disjuntores estão ativos e, conseqüentemente, quais alimentadores estão conectados para o cálculo da impedância equivalente de Thévenin. Em seguida, calcula-se a admitância equivalente do SDEE e as injeções de corrente. Por fim, calculam-se apenas as correntes trifásicas e monofásicas, pois são essenciais para ajustar os dispositivos de sobrecorrente. Em seguida, essas correntes são enviadas para o bloco de lógica *fuzzy*, onde será calculado o novo valor de I_p .

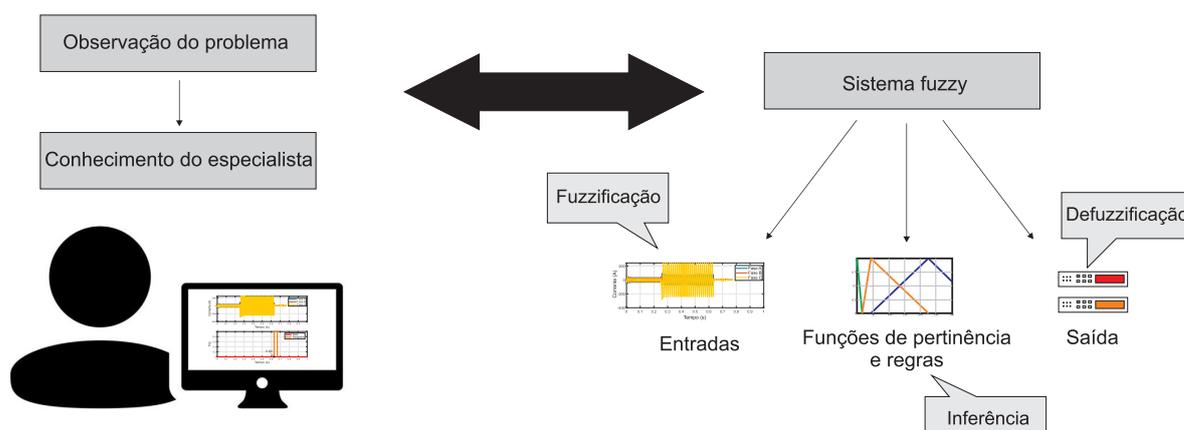
Figura 17 – Fluxograma do cálculo de curto-circuito.



Fonte: Autoria própria.

4.2 ELABORAÇÃO DO SISTEMA FUZZY

O sistema *fuzzy* proposto para auxiliar na coordenação dos SDEE com inserção de GFV foi desenvolvido de acordo com o esquema apresentado na Figura 18. O primeiro passo na construção do sistema *fuzzy* consiste na base do conhecimento sobre o problema. Como em qualquer processo de modelagem deve-se, inicialmente, determinar quais são as variáveis de entrada e de saída do sistema. Nesta Tese, foram consideradas como variáveis de entrada a corrente de carga e a corrente de curto-circuito, enquanto que a variável de saída será I_p .

Figura 18 – Sistema *fuzzy* proposto.

Fonte: Autoria própria.

A corrente I_p foi definida como sendo uma variável de saída porque representa o parâmetro que determina se o sistema está em regime de falta. Esta corrente varia entre um valor mínimo (geralmente relacionado ao valor máximo de sobrecarga do sistema) e um valor máximo (geralmente a corrente mínima de curto-circuito), conforme Equação 28 (KINDERMANN, 2005):

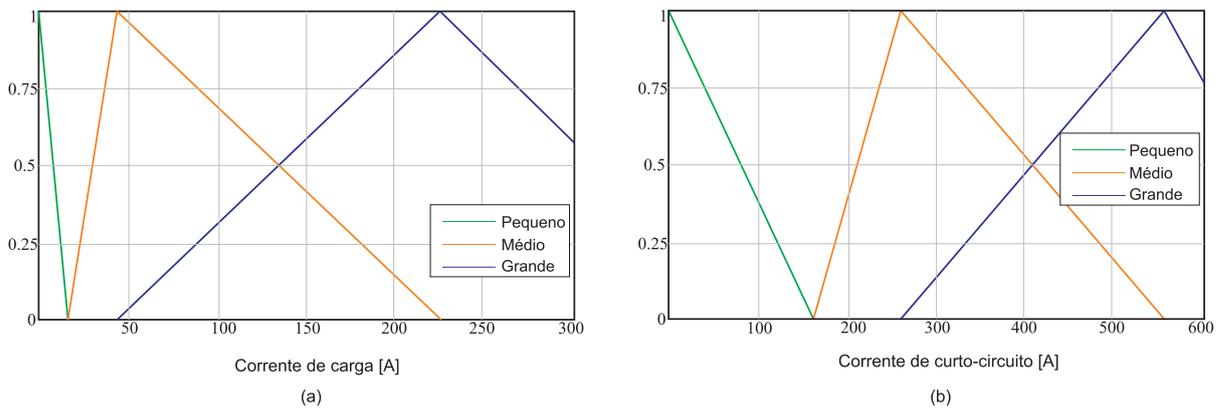
$$FC \cdot I_{\text{carga,max}} \leq I_p \leq I_{\text{cc,min}}, \quad (28)$$

onde: $I_{\text{carga,max}}$ e $I_{\text{cc,min}}$ são os valores da corrente de carga máxima e da corrente mínima de falta, respectivamente e FC é o fator de crescimento de carga, dado por: $FC = \left(1 + \frac{X\%}{100}\right)^a$, em que $X\%$ é o fator percentual de crescimento de carga anual e a é o número de anos considerado como horizonte de estudo.

Em seguida, deve-se proceder para escolha dos conjuntos *fuzzy*. Uma das formas de selecioná-los é a partir do conhecimento do especialista para obter as funções de pertinência. De acordo com SIMÕES e SHAW (2007), um número prático de funções de pertinência é um valor entre dois e sete. Quanto maior o número de funções, maior a precisão, porém aumenta o esforço computacional. Além disso, a partir de sete funções não se observam melhorias significativas na precisão. Nos problemas de engenharia utilizam-se as funções trapezoidais e triangulares para a representação convencional das funções de pertinência: a representação trapezoidal mapeia as funções de pertinência nos extremos, enquanto que as triangulares mapeiam as variáveis em pequenas regiões bem definidas (MACÊDO, 2012). Após análises pré-liminares apresentadas na Seção 6.1, em virtude de atender ao princípio de velocidade da filosofia da proteção e por reduzir o esforço computacional, optou-se por adotar três funções triangulares para a entrada e três funções trapezoidais para a saída, visto que é mais veloz e leva a um menor esforço computacional, conforme apresentado nas Figuras 19 e 20, respectivamente. A Tabela 3

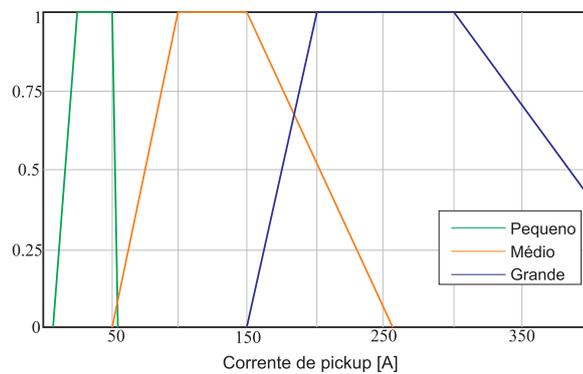
contém os termos linguísticos definidos para essas funções de pertinência, as quais foram definidas após utilizar o conhecimento do especialista para acomodar da melhor forma a variação observada para as variáveis de entrada e saída, sendo refinadas ao longo das simulações.

Figura 19 – Funções de pertinência triangulares de entrada: (a) Corrente de carga e (b) Corrente de curto-circuito.



Fonte: Autoria própria.

Figura 20 – Funções de pertinência trapezoidais de saída: corrente de pickup.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 3 – Termos linguísticos adotados para as variáveis do sistema *fuzzy*.

Variáveis de entrada e saída	Termo linguístico		
	Corrente de carga - I_c	Pequeno (I_{c1})	Médio (I_{c2})
Corrente de curto-circuito - I_{cc}	Pequeno (I_{cc1})	médio (I_{cc2})	Grande (I_{cc3})
Corrente de <i>pickup</i> - I_p	Pequeno (I_{p1})	Médio (I_{p2})	Grande (I_{p3})

O próximo passo para a construção do sistema *fuzzy* consiste em escolher as regras que irão relacionar as funções de pertinência. Tais regras irão definir o relacionamento

das funções de entrada e saída, sendo descritas de acordo com o resultado desejado. Nesta Tese, adotou-se a regra de inferência *fuzzy* do tipo “Se-Então”, a qual 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 (MOMESSO *et al.*, 2019).

Para o SPA_{fuzzy}, em função das possibilidades, do número de variáveis linguísticas definidas, valendo-se do conhecimento e observação do especialista e após analisar extensivamente o desempenho do SDEE considerando a inserção da GD, variando seus níveis de potência e observando a sua influência nas variáveis de entrada, definiu-se o seguinte conjunto de regras:

- Regra 1: Se $I_c = I_{c1}$ E $I_{cc} = I_{cc1}$, então Saída = I_{p1} .
- Regra 2: Se $I_c = I_{c2}$ E $I_{cc} = I_{cc1}$, então Saída = I_{p1} .
- Regra 3: Se $I_c = I_{c3}$ E $I_{cc} = I_{cc1}$, então Saída = I_{p2} .
- Regra 4: Se $I_c = I_{c1}$ E $I_{cc} = I_{cc2}$, então Saída = I_{p2} .
- Regra 5: Se $I_c = I_{c2}$ E $I_{cc} = I_{cc2}$, então Saída = I_{p2} .
- Regra 6: Se $I_c = I_{c3}$ E $I_{cc} = I_{cc2}$, então Saída = I_{p3} .
- Regra 7: Se $I_c = I_{c1}$ E $I_{cc} = I_{cc3}$, então Saída = I_{p2} .
- Regra 8: Se $I_c = I_{c2}$ E $I_{cc} = I_{cc3}$, então Saída = I_{p3} .
- Regra 9: Se $I_c = I_{c3}$ E $I_{cc} = I_{cc3}$, então Saída = I_{p3} .

Para entendimento da interpretação das regras, tem-se para a Regra 1: "Se a corrente de carga for pequena e a corrente de curto-circuito também for pequena, então a corrente de *pickup* será pequena". Ou seja, as variáveis de entrada com valores pequenos resultam em uma saída com valor pequeno. As demais regras seguem o mesmo raciocínio, com os termos linguísticos definidos na Tabela 3.

Realizadas as etapas mencionadas, elaborou-se o sistema *fuzzy* apresentado na Figura 18, o qual é composto pelas etapas já mencionadas no capítulo anterior: i) Fuzzificação; ii) Inferência e iii) Defuzzificação. Portanto, a fuzzificação recebe o valor da corrente de carga e da corrente de curto-circuito referentes às variáveis de entrada, transformando-as em variáveis linguísticas e, a partir das funções de pertinência, o mapa de regras é ativado. A inferência utilizada é do tipo *max-prod*, pois fornece melhor continuidade e uma saída mais suave. O conjunto de regras é completamente verificado, visando garantir quais regras devem ser ativadas. Por fim, a saída *fuzzy* é defuzzificada por meio do método Centróide (MONARO *et al.*, 2015), (KUMAR *et al.*, 2016).

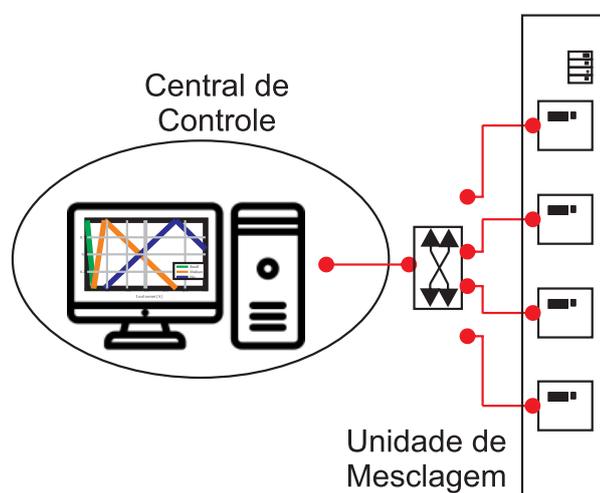
4.3 ENVIO DOS NOVOS AJUSTES

Obtido o novo valor de I_p , o SPA_{fuzzy} é responsável por enviá-lo para os relés e religadores digitais, visto que os dispositivos microprocessados digitais podem ser configurados *online*. O conceito de proteção centralizada baseia-se na premissa de que as funções de proteção e controle de vários dispositivos estão vinculados a uma unidade de processamento central dentro de uma SE.

Isso significa que apenas a funcionalidade da *interface* de processo nos dispositivos de *hardware* é manipulada pela Unidade de Mesclagem, dispositivo que converte medições analógicas do SDEE em sinais digitais (STARCK *et al.*, 2024; FERNÁNDEZ *et al.*, 2024). O padrão IEC 61850 desempenha um papel crucial na habilitação da proteção centralizada e na facilitação da comunicação rápida e padronizada baseada em Ethernet (STARCK *et al.*, 2024).

Desde que o IEC 61850 foi implementado, o barramento da estação minimiza os fios de cobre entre as unidades de relé/religador de proteção numérica para comunicações de relé/religador no nível horizontal. O barramento de processo permite o compartilhamento padronizado de informações digitalizadas de transformadores de instrumentos ou sensores com outros relés/religadores e centro de controle. A Figura 21 ilustra a representação deste conceito de controle central.

Figura 21 – Comunicação da central de controle.



4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentadas as etapas do SPA_{fuzzy} proposto. Inicialmente, apresentou-se a arquitetura do SPA_{fuzzy}, o qual é dividido em dois módulos: i) monitoramento, realizado a partir dos canais analógicos e digitais dos relés e religadores; ii) cálculo dos novos ajustes, responsável por processar os dados obtidos *online* e calcular I_p

utilizando como ferramenta a lógica *fuzzy*. Foram descritas as variáveis de entrada e de saída do SPA_{fuzzy}, assim como os termos linguísticos adotados para essas variáveis e as regras que irão relacionar as funções de pertinência, cujo conhecimento do especialista é de fundamental importância para que o método de coordenação proposto respeite os critérios estabelecidos pelas normas das concessionárias de energia elétrica.

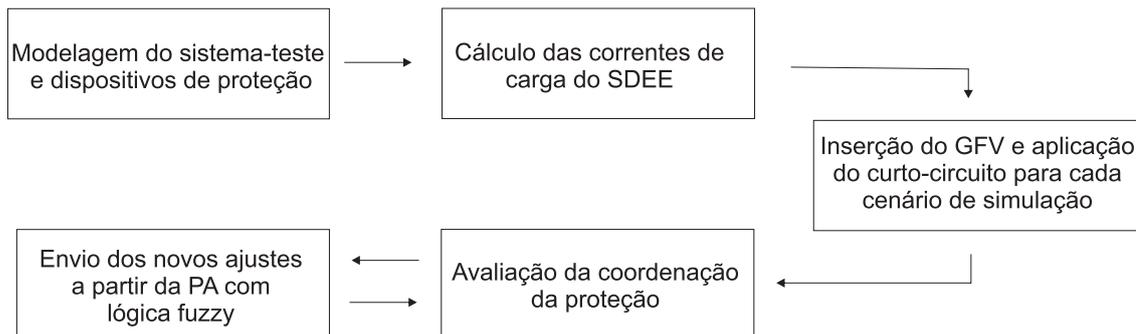
MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo apresentam-se os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do método proposto.

5.1 METODOLOGIA

Para avaliar o desempenho do SPA_{fuzzy}, aplicou-se a metodologia apresentada na Figura 22 e detalhada a seguir. Inicialmente, o sistema-teste e os dispositivos de proteção de sobrecorrente foram modelados e, em seguida, foram obtidas as correntes de carga para realização da parametrização da proteção de sobrecorrente. O próximo passo consistiu na inserção dos GFV e aplicação dos curtos-circuitos para os cenários de análise. Assim, por meio destes, avaliou-se a coordenação da proteção, tendo como referência o esquema de proteção de sobrecorrente tradicional, o qual é parametrizado seguindo as resoluções normativas (ELETROBRÁS, 1982; ENERGISA, 2017). Nos casos em que ocorrerem descoordenação entre os dispositivos de proteção, os novos ajustes serão enviados para os relés e religadores de sobrecorrente por meio do SPA_{fuzzy}. Todas as etapas de programação e simulação foram realizadas na plataforma Simulink (MATLAB®).

Figura 22 – Metodologia adotada.



Fonte: Autoria própria.

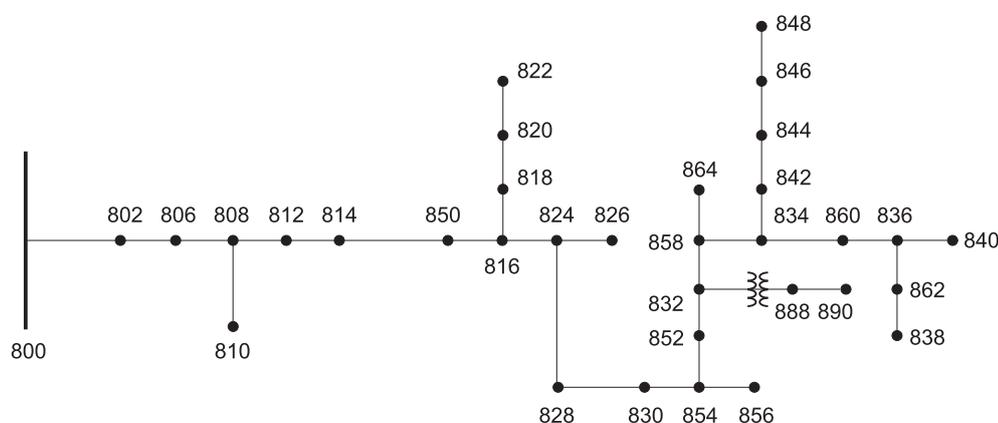
5.2 SISTEMA-TESTE

A análise do SPA_{fuzzy} para SDEE deu-se por meio do uso de dois sistemas-testes do IEEE: um sistema de 34 barras, o qual foi utilizado para validação do sistema proposto, e outro sistema de 69 barras, o qual foi utilizado para avaliar o desempenho do SPA_{fuzzy} para casos críticos em um sistema de maior porte.

5.2.1 Sistema-Teste IEEE 34 barras

O diagrama unifilar desse sistema é apresentado na Figura 23, o qual tem sido largamente utilizado pela comunidade científica para estudos relacionados com os SDEE (KERSTING, 1991). Esse sistema consiste de um alimentador primário de 24,9 kV, sendo caracterizado por ser muito longo e levemente carregado. Possui capacitores em derivação para compensar o baixo fator de potência do sistema (devido à grande quantidade de cargas indutivas), cargas de potência, corrente e impedância constantes e cargas desequilibradas. Maiores detalhes acerca das suas configurações estão disponíveis no Anexo A.

Figura 23 – Sistema-teste IEEE 34 barras (modificado).



Fonte: Autoria própria.

O sistema foi modificado, para atender aos objetivos dessa Tese da seguinte forma:

- Inserção dos GFV com potências de 200 kW, 400 kW e 800 kW com instalação localizada à montante e à jusante dos locais de instalação dos religadores, baseado em LIMA *et al.* (2024).
- Instalação dos dispositivos de proteção seguindo os critérios comumente praticados pelas concessionárias de distribuição de energia elétrica de acordo com as suas Normas Técnicas (ELETROBRÁS, 1982). Além disso, a metodologia desenvolvida por GUARDA (2017) também serviu de embasamento para determinação desses locais. Os parâmetros dos dispositivos de proteção foram determinados pelas correntes de carga e de curto-circuito do relatório do IEEE (KERSTING, 1991). Ao final, instalou-se um relé de sobrecorrente direcional na SE (barra 800), religador 1 na barra 824, religador 2 na barra 858 e fusíveis nos ramais laterais do SDEE.
- A presença de reguladores de tensão não foi considerada, pois a GD tende a promover uma melhoria no perfil de tensão (BHISE *et al.*, 2017).

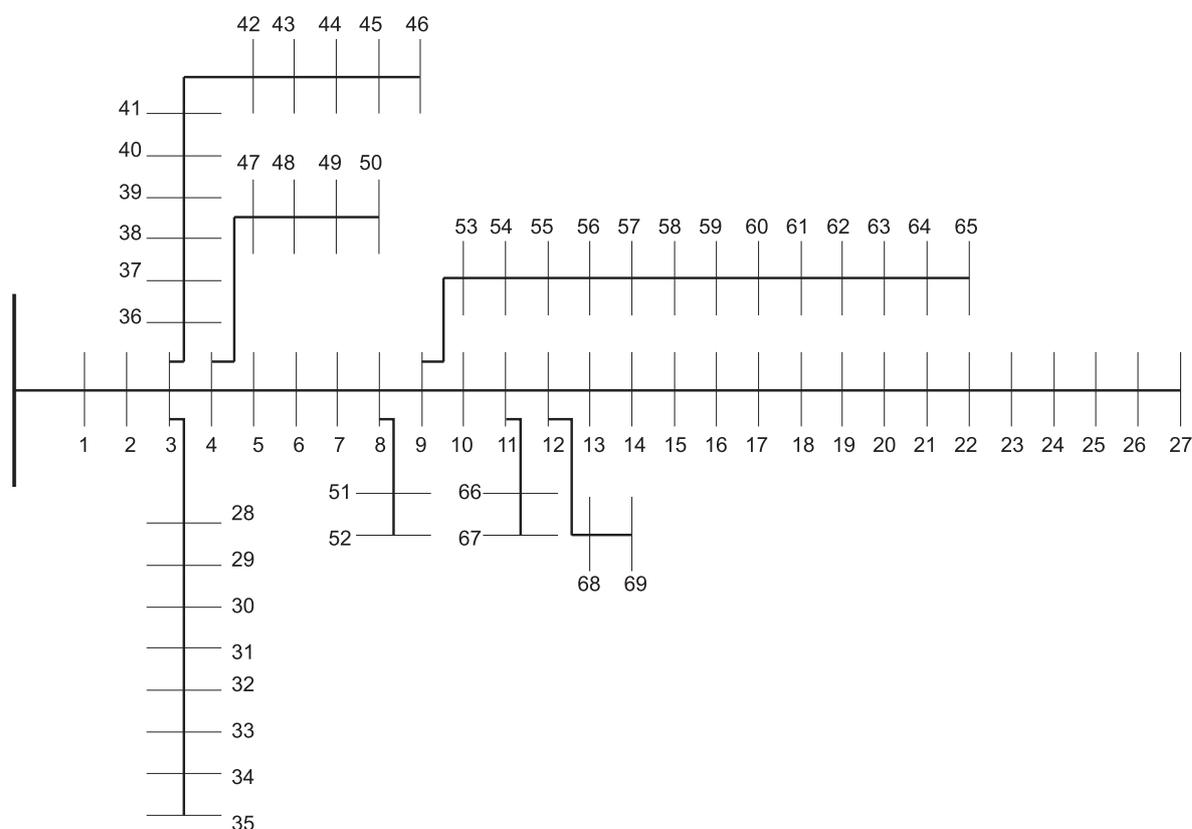
5.2.2 Sistema-Teste IEEE 69 barras

O diagrama unifilar desse sistema é apresentado na Figura 24, o qual opera na tensão nominal de 12,66 kV e potência nominal de 10 MVA. Esse sistema possui carga total de 3.800 kW e 2.690 kVAr. As perdas totais de potência reativa são de 102,2 kVAr. Os dados desse alimentador estão disponíveis no Anexo B.

Assim como o sistema-teste IEEE 34 barras, a instalação dos dispositivos de proteção no sistema-teste IEEE 69 barras seguiram as Normas Técnicas praticadas pelas concessionárias de distribuição de energia elétrica. Ao final, instalou-se um relé de sobrecorrente direcional na SE, religador 1 na barra 36, religador 2 na barra 53 e fusíveis nos ramais laterais do SDEE.

A metodologia de avaliação da coordenação da proteção de sobrecorrente adotada para o sistema-teste IEEE 34 barras também foi adotada para o sistema-teste IEEE 69 barras, isto é, foram inseridos GFV com potências de 200 kW, 400 kW e 800 kW localizados à montante e à jusante dos locais de instalação do religadores e foram aplicados curtos-circuitos ao longo do alimentador.

Figura 24 – Sistema-teste IEEE 69 barras.



Fonte: Autoria própria.

5.3 MODELAGEM DOS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

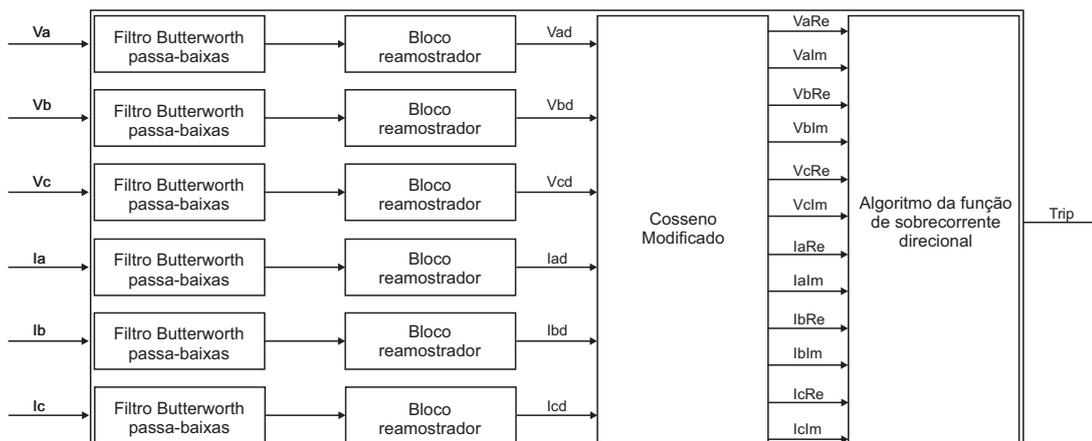
A seguir são apresentadas as etapas de modelagem do relé de sobrecorrente direcional, fusível e religador.

5.3.1 Relé de Sobrecorrente Direcional

O relé de sobrecorrente direcional foi modelado conforme a arquitetura clássica dos relés digitais e adotou-se o modelo proposto por NASCIMENTO (2020). O processo foi realizado a partir de uma combinação entre os blocos disponíveis no Simulink e com o desenvolvimento de funções utilizando o bloco *S-Function*, o qual atua normalmente com outros blocos do Simulink e permite emular funções desenvolvidas pelo usuário na linguagem de programação C/C++ ou linguagem MATLAB®. A arquitetura do relé está representada na Figura 25, seguido da descrição de cada bloco que o constitui:

- Filtro *Butterworth* Passa-Baixas: filtra os componentes de alta frequência conforme o Teorema de Nyquist. Utilizou-se um filtro *Butterworth* passa-baixas de ordem 2, com frequência de corte de 180 Hz e comumente utilizado em proteção (COURY *et al.*, 2011). Esse bloco integra a biblioteca do Simulink;
- Bloco Reamostrador: converte os sinais para o formato digital, a partir de uma frequência de amostragem de 960 Hz, isto é, 16 amostras por ciclo. Esse valor é usual em sistemas de proteção, uma vez que assegura o compromisso entre velocidade de processamento e precisão. Esse bloco integra a biblioteca do Simulink;
- Cosseno Modificado: estima os fasores de tensão e corrente, os quais serão avaliados pelo algoritmo de sobrecorrente. Apesar de existirem outros métodos baseados na estimação de fasores, optou-se pelo cosseno modificado por ser um dos mais difundidos pela literatura, devido a sua eficácia e baixo esforço computacional. Esse bloco foi programado via *S-Function*;
- Algoritmo de Proteção: emula a função de sobrecorrente direcional de tempo inverso de um relé real (NASCIMENTO *et al.*, 2018; LOPES *et al.*, 2017). Apresenta como entrada os valores de tensão e corrente no formato fasorial retangular e a saída é o sinal de *trip* para o disjuntor. Esse bloco foi programado via *S-Function*.

Figura 25 – Arquitetura do relé digital implementado.



Fonte: Adaptado de NASCIMENTO (2020).

5.3.2 Fusível

Como a biblioteca do Simulink não contém o modelo do fusível, foi necessário realizar a modelagem desse elemento. Para isso, utilizou-se a linguagem *S-function*, a qual permite descrever um bloco do Simulink em uma linguagem de programação que pode ser “carregada” e executada automaticamente no MATLAB®.

O modelo do fusível programado baseia-se na curva de operação característica (tempo *versus* corrente) e apresenta a vantagem de ser genérico, isto é, pode-se inserir a curva de operação característica de cada dispositivo utilizado, independente do tipo de fabricante, e representar seu desempenho durante análises de simulações. O fluxograma elaborado é apresentado na Figura 26.

O dispositivo modelado irá atuar caso a corrente monitorada por ele atinja os níveis presentes na curva de operação característica. Como foram selecionadas curvas com baixas resoluções, aplicou-se o processo de regressão linear simples, pois é válido para curvas com baixa resolução, uma vez que não há grandes perdas de precisão. Dessa forma, caso a corrente de curto-circuito esteja entre os valores presentes na curva de operação característica, a regressão linear simples ocorre obedecendo as relações matemáticas representadas nas Equações 29-32. A partir do instante de curto-circuito e da obtenção do tempo total de interrupção, chaves controladas remotamente podem ser abertas, representando a atuação da proteção.

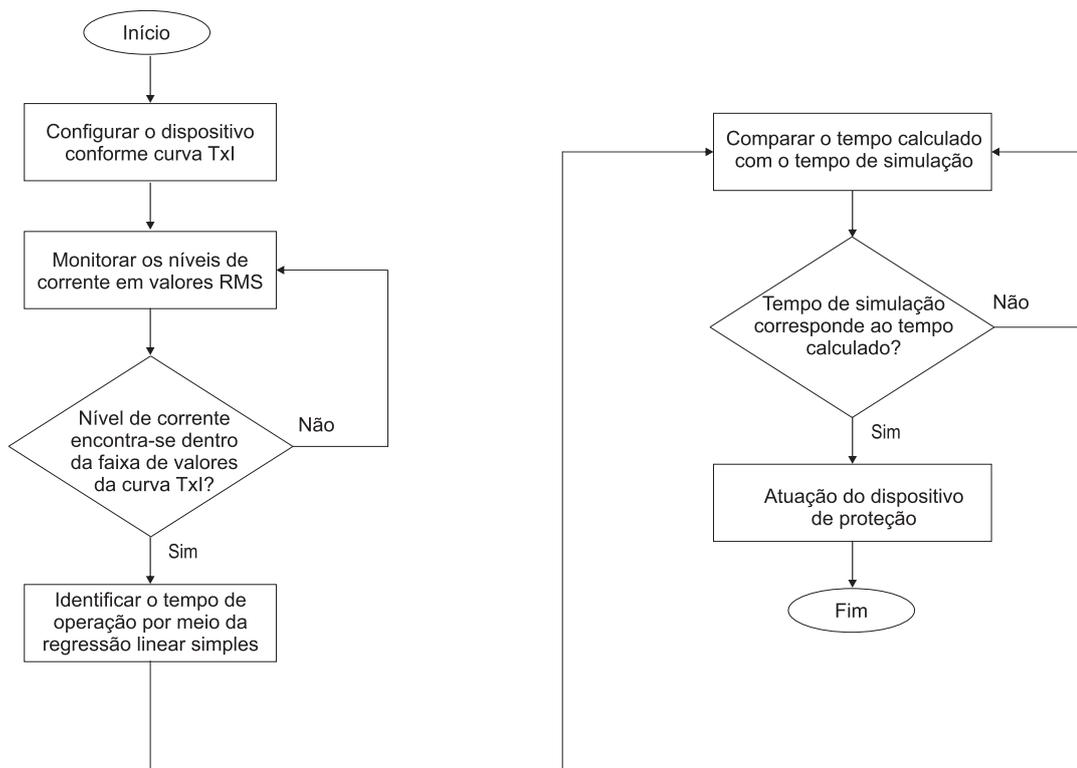
$$\Delta I = I_{\text{dispositivo}[\text{posição}]} - I_{\text{dispositivo}[\text{posição}+1]} \quad (29)$$

$$A = \frac{(I_{\text{dispositivo}[\text{posição}]} - I_{cc}) \cdot T_{\text{dispositivo}[\text{posição}+1]}}{\Delta I} \quad (30)$$

$$B = \frac{(I_{cc} - I_{\text{dispositivo}[\text{posição}+1]}) \cdot T_{\text{dispositivo}[\text{posição}]}}{\Delta I} \quad (31)$$

$$\text{Tempo Total} = A + B. \quad (32)$$

Figura 26 – Fluxograma para modelagem de fusíveis e religadores.



Fonte: Autoria própria.

Normalmente, os fusíveis tipo K são os mais utilizados em SDEE para proteção de ramais devido a sua rápida operação. Apresenta-se na Tabela 4 os tipos de fusíveis que serão instalados para atuar na proteção do sistema-teste IEEE 34 barras.

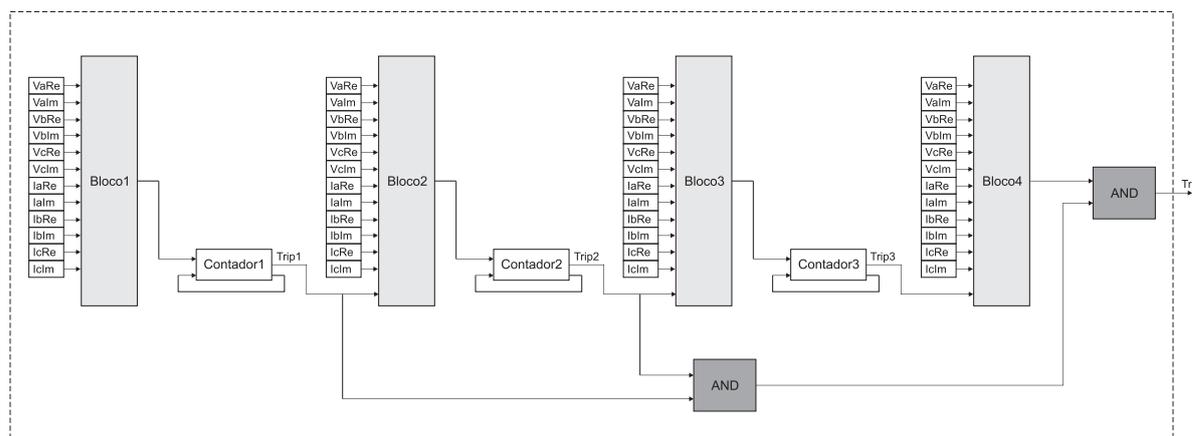
Tabela 4 – Locais de instalação dos dispositivos de proteção e correntes de carga máxima.

Fusível	Fusível escolhido - Tipo K
F1	10 K
F2	15 K
F3	15 K
F4	15 K
F5	25 K
F6	15 K

5.3.3 Religador Digital

Assim como o fusível, a biblioteca do Simulink não disponibiliza modelo de religador. Dessa forma, a combinação dos blocos disponíveis no Simulink e da linguagem *S-function* permitiu a programação de funções específicas para desenvolvimento do modelo do religador (PEREIRA *et al.*, 2024), apresentado na Figura 27.

Figura 27 – Bloco religador digital.



Fonte: Autoria própria.

A arquitetura interna do religador modelado é semelhante a do relé digital apresentado na Figura 25. Portanto, visando otimizar o processo de desenvolvimento do religador, o foco da modelagem consistiu nas funcionalidades do equipamento e nas etapas subsequentes à aquisição dos dados analógicos pela unidade de entrada. Ou seja, o modelo desenvolvido simula o desempenho do religador com base em dados já coletados, omitindo a etapa de aquisição na modelagem.

O tempo total de atuação do religador foi modelado como a soma dos tempos de abertura e religamento, isto é, o tempo total de operação do religador é dado pela soma do tempo do primeiro disparo do religador, tempo de interrupção e tempo de operação, conforme apresentado na Equação 33. Essa formulação assemelha-se aos religadores reais empregados pelas concessionárias, respeitando os critérios de coordenação e seletividade do sistema.

$$T_{\text{religador}} = t_0 + \sum_{i \in \alpha} t_R(i). \quad (33)$$

Sendo: t_0 o tempo da primeira abertura do religador, pré-determinado através dos ajustes no religador e equivalente a dois ciclos; $t_R(i)$ o tempo de atuação do religador e α são os pares de tempos de interrupção e operação.

Para coordenar os fusíveis e religadores, aplicou-se a técnica *fuse-save* para faltas temporárias e programou-se o religador para responder com uma operação rápida. Assim, se a falta for temporária, ela será eliminada pelo religador e não será necessário trocar um fusível. Na permanência de sobrecorrente no SDEE, o religador responde com uma sequência de duas operações lentas com o objetivo de aguardar a atuação coordenada dos fusíveis.

5.3.4 Disjuntor

O disjuntor é um equipamento de manobra utilizado para a energização e interrupção de circuitos, cuja função é abrir o circuito em condições de ocorrência de faltas, funcionando como dispositivo de proteção (FILHO; MAMEDE, 2011). Para simulação do disjuntor, utilizou-se o modelo de disjuntor trifásico disponível na biblioteca do Simulink (MATHWORKS, 2024b). O bloco do disjuntor trifásico implementa um disjuntor trifásico onde os tempos de abertura e fechamento podem ser controlados no Simulink por um sinal externo (modo de controle externo) ou por um temporizador de controle interno (modo de controle interno).

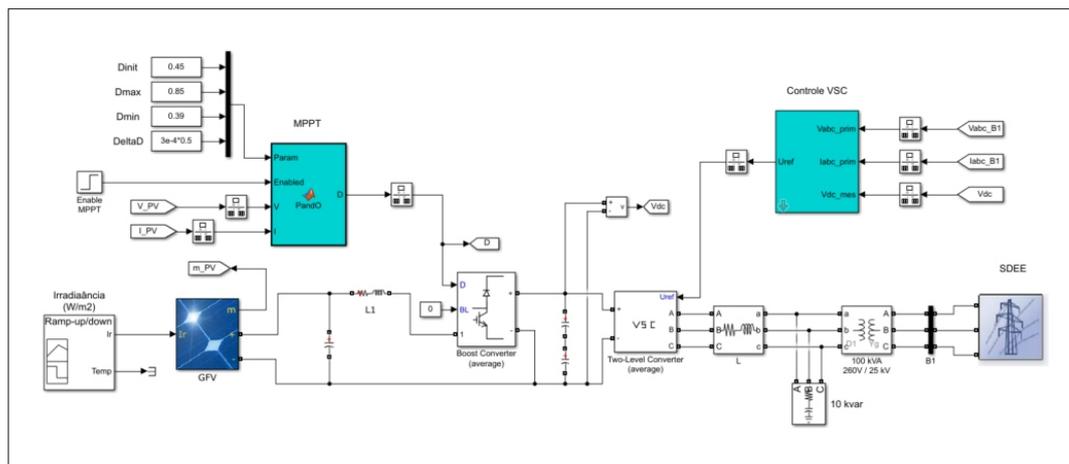
A abertura do disjuntor representa a eliminação de um cenário de falta e o sinal de controle conectado à entrada Simulink deve ser 0 (zero). Qualquer valor positivo fecha os contatos do disjuntor, ou seja, um sinal é comumente usado para fechar os disjuntores.

5.4 SISTEMA FOTOVOLTAICO

Nesta Tese, a GD foi representada pelo GFV cujo modelo está disponível na biblioteca do *Simulink* e ilustrado na Figura 28. O GFV fornece uma potência máxima de 100 kW com irradiância de 1000 W/m². Mais detalhes dos componentes desse modelo podem ser consultados em MATHWORKS (2021). As especificações do fabricante para um módulo estão apresentadas na Tabela 5.

A conexão do GFV com o SDEE ocorre por meio de um conversor *boost*, um inversor trifásico de tensão a três níveis (VSC) e um transformador de acoplamento trifásico de 100 kVA com relação 260 V/24,9 kV. Além disso, esse modelo calcula o MPPT por meio da técnica *Perturb & Observe* (P&O), disponível no Simulink. O método P&O opera periodicamente incrementando ou decrementando a tensão do terminal de saída do GFV e comparando a potência obtida no ciclo atual com a potência do ciclo anterior. Se a tensão variar e a potência aumentar, o sistema de controle altera o ponto de operação nessa direção, caso contrário, altera o ponto de operação na direção oposta (BRITO *et al.*, 2011).

Figura 28 – Modelo do GFV utilizado.



Fonte: MATHWORKS (2021)

Tabela 5 – Especificações para um painel fotovoltaico.

Número de células conectadas em série	96
Tensão de circuito aberto (V_{ca})	64,2 V
Corrente de curto-circuito (I_{cc})	5,96 A
Tensão na máxima potência (V_{mp})	54,7 V
Corrente na máxima potência (I_{mp})	5,58 A

Fonte: MATHWORKS (2021).

5.5 LÓGICA FUZZY

A lógica *fuzzy* foi empregada com o objetivo de alterar I_p quando o SPA_{fuzzy} detectar mudanças na configuração do SDEE, tendo como variáveis de entrada as correntes de carga e de curto-circuito.

Esta Tese utilizou o *fuzzy Logic Toolbox* do software MATLAB[®], o qual é acessado diretamente ao digitar *fuzzyLogicDesigner* no terminal do programa. O *fuzzy Logic Toolbox* fornece funções no MATLAB, aplicativos e um bloco de lógica *fuzzy* no Simulink, o qual permite ao usuário especificar e configurar entradas, saídas, funções de associação e regras de sistemas de inferência *fuzzy*. Além disso, permite o ajuste automático de funções de associação e regras de um sistema de inferência *fuzzy* a partir de dados e possibilita utilizar o sistema de inferência como uma ferramenta de suporte para explicar modelos de caixa-preta baseados em inteligência artificial (MATHWORKS, 2024a). O Apêndice A apresenta o procedimento realizado para a utilização da lógica *fuzzy* no *fuzzy Logic Toolbox*.

O uso do *fuzzy Logic Toolbox* possibilitou configurar as funções de pertinência de

entrada e de saída do bloco de controle *fuzzy* proposto, as regras de controle e simular o desempenho do sistema de maneira discreta.

5.6 BASE DE DADOS

Para validar o SPA_{fuzzy}, construiu-se a base de dados apresentada na Tabela 6, sendo todos os casos simulados no sistema-teste IEEE 34 barras. Destaca-se que: i) os locais de aplicação dos curtos-circuitos foram escolhidos visando facilitar a observação da atuação da coordenação da proteção de sobrecorrente, baseado no estudo realizado por LIMA *et al.* (2024) sobre o impacto do local de instalação do GFV na coordenação da proteção de sobrecorrente. É importante destacar que não foram considerados locais de aplicação de curto-circuito entre as barras, em virtude dos sistemas-testes considerados não serem extensos; ii) os valores adotados para a resistência de falta (R_f) basearam-se na literatura especializada; iii) a potência máxima dos GFV corresponde à 50% do valor das cargas instaladas no sistema-teste IEEE 34 barras, de acordo com o estudo realizado em LIMA *et al.* (2024); iv) os GFV foram inseridos à montante e à jusante dos locais de instalação dos religadores, visando observar sua influência na atuação da coordenação de sobrecorrente.

Tabela 6 – Base de dados.

Variáveis de simulação	Descrição	Número de casos
Tipo de falta	AT, BT, CT, AB, BC, CA, ABT, BCT, CAT, ABC, ABCT	11
Localização da falta	830, 834 e 840	3
Resistência de falta (Ω)	0, 5, 10 e 20	4
Potência do GFV (kW)	0, 200, 400, 800	4
Localização do GFV	812, 852, 832, 836	4
Total		2112

5.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta seção foram apresentadas a metodologia desenvolvida para avaliar o desempenho do SPA_{fuzzy}. Para isso, os sistemas-testes utilizados foram descritos e o processo de modelagem dos dispositivos de proteção de sobrecorrente foi detalhado. Por fim, o modelo do GFV, o sistema *fuzzy* e a base de dados para ser aplicada na validação do sistema proposto foram apresentados.

ANÁLISE E RESULTADOS

Este capítulo contém a apresentação e análise dos resultados baseado na metodologia proposta no capítulo 5.

6.1 DEFINIÇÃO DO NÚMERO DE VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS

Para definir o número de variáveis linguísticas utilizadas no SPA_{fuzzy}, realizou-se uma análise dos efeitos de quatro níveis de resolução *fuzzy* no procedimento de coordenação simultânea entre relés de sobrecorrente, fusíveis e religadores, aplicados nos sistemas-testes IEEE 34 e 69 (descritos no Anexo A), avaliando se há benefícios ou não com o aumento dos termos linguísticos da lógica *fuzzy*, de modo a ilustrar os benefícios nessa aplicação proposta. Para esse estudo, foram definidos quatro níveis de resolução, tanto para as entradas como para as saídas: i) Cenário Fuzzy1; ii) Cenário Fuzzy2; iii) Cenário Fuzzy3 e iv) Cenário Fuzzy4. Os termos linguísticos definidos para as funções de pertinência de cada um dos cenários considerados estão definidos a seguir:

- Cenário Fuzzy1: Pequeno₁, Médio₁, Elevado₁;
- Cenário Fuzzy2: Pequeno₁, Pequeno₂, Médio₁, Médio₂, Elevado₁, Elevado₂;
- Cenário Fuzzy3: Pequeno₁, Pequeno₂, Pequeno₃, Médio₁, Médio₂, Médio₃, Elevado₁, Elevado₂, Elevado₃;
- Cenário Fuzzy4: Pequeno₁, Pequeno₂, Pequeno₃, Pequeno₄, Médio₁, Médio₂, Médio₃, Médio₄, Elevado₁, Elevado₂, Elevado₃, Elevado₄.

A solução proposta foi validada por meio de seis casos, sendo os Casos 1, 2 e 3 para o sistema-teste IEEE 34 barras e os Casos 4, 5 e 6 para o sistema-teste IEEE 69 barras, conforme descrito a seguir. A Tabela 7 apresenta os tempos de atuação obtidos para os casos simulados com o uso ou não da lógica *fuzzy*.

- Caso 1: GFV instalado na barra 852 e curto-circuito trifásico na barra 830, com $R_f = 5 \Omega$;
- Caso 2: GFV instalado na barra 836 e curto-circuito bifásico na barra 840, com $R_f = 5 \Omega$;

- Caso 3: GFV instalado nas barras 832 e 836 e curto-circuito monofásico na barra 834, com $R_f=5 \Omega$;
- Caso 4: GFV instalado na barra 41 e curto-circuito monofásico na barra 42, com $R_f=5 \Omega$;
- Caso 5: GFV instalado na barra 65 e curto-circuito trifásico na barra 58, com $R_f=5 \Omega$;
- Caso 6: GFV instalado nas barras 8 e 65 e curto-circuito bifásico-terra na barra 58, com $R_f=5 \Omega$.

Tabela 7 – Tempo de atuação da proteção de sobrecorrente com e sem lógica *fuzzy*.

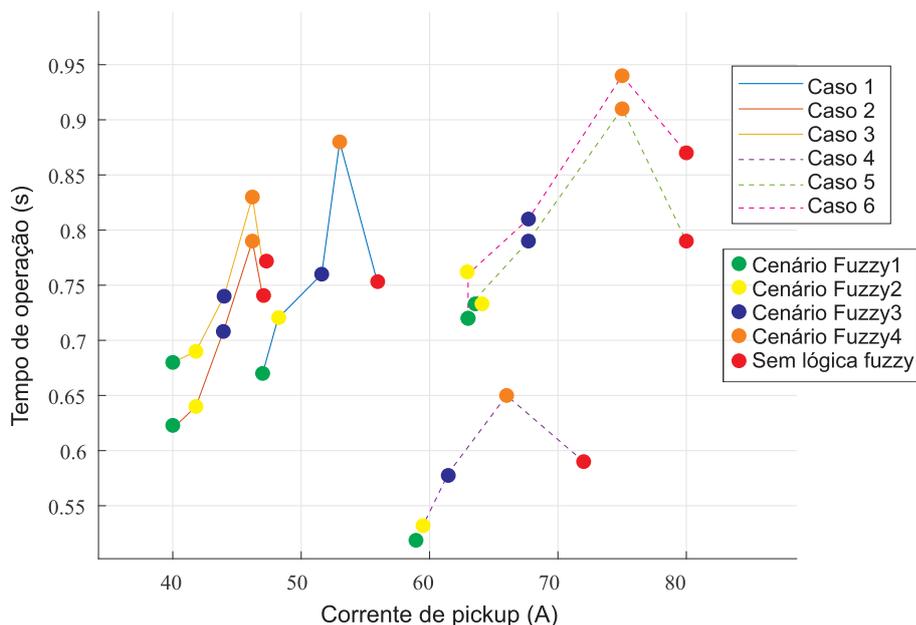
Casos	Cenário Fuzzy1	Cenário Fuzzy2	Cenário Fuzzy3	Cenário Fuzzy4	Sem lógica fuzzy
Caso 1	0,67	0,72	0,76	0,88	0,75
Caso 2	0,62	0,64	0,71	0,79	0,74
Caso 3	0,68	0,69	0,74	0,83	0,77
Caso 4	0,52	0,53	0,58	0,65	0,59
Caso 5	0,73	0,73	0,79	0,91	0,79
Caso 6	0,72	0,76	0,81	0,94	0,87

A Figura 29 ilustra as I_p obtidas após a etapa de defuzzificação do sistema *fuzzy* e o tempo de atuação dos dispositivos de sobrecorrente para os casos avaliados. A partir do gráfico gerado fica evidente que à medida que o número de variáveis linguísticas utilizadas pela lógica *fuzzy* aumenta, o valor da I_p obtida pelo SPA_{fuzzy} após a etapa de defuzzificação também aumenta, assim como o tempo de atuação do religador. Conclui-se portanto que aumentar a quantidade de variáveis linguísticas gera um maior esforço computacional e não é garantia de que serão obtidas melhorias significativas na precisão dos relés e religadores de sobrecorrente. Desta forma, adotou-se nesta Tese o uso de três variáveis linguísticas para a entrada e três variáveis linguísticas para a saída, visto que é mais veloz e leva um menor esforço computacional. Optar pela utilização de três variáveis permite abranger de uma melhor forma os valores de entrada e saída do SPA_{fuzzy}. Essa análise qualitativa sobre os números de variáveis linguísticas adotadas na construção do sistema *fuzzy* contribui para o estado da arte e serve como base para auxiliar na problemática da coordenação de sobrecorrente de SDEE com inserção de geradores fotovoltaicos.

6.2 EXEMPLO DO FUNCIONAMENTO DO SPA_{fuzzy}

Para exemplificar o funcionamento do SPA_{fuzzy}, será considerado novamente o caso exemplo apresentado no Capítulo 2, Seção 2.4.4. Quando o SPA_{fuzzy} detecta uma

Figura 29 – Desempenho dos cenários *fuzzy* analisados.



mudança no *status* do disjuntor e na potência do SDEE, conforme apresentado na Figura 30, o SPA_{fuzzy} executa a lógica *fuzzy*. Após a defuzzificação, apenas a regra cinco é ativada, resultando em I_p no valor de 40 A, conforme Figura 31. Ao atualizar I_p do religador 2 para esse novo valor, observa-se, a partir do coordenograma da Figura 32, que a técnica *fuse-save* foi reestabelecida. O religador agora atua na sua curva rápida (cor laranja) com um tempo de 0,65 s.

Figura 30 – Detecção de alteração do estado do disjuntor e da potência do SDEE.

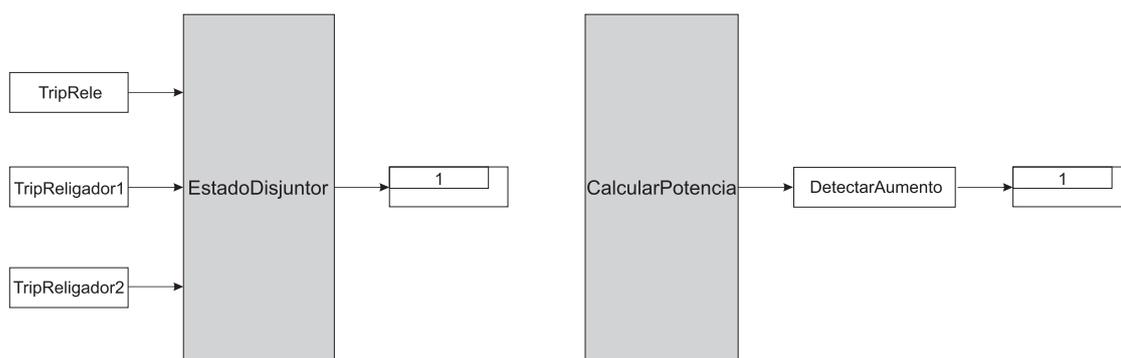


Figura 31 – Defuzzificação para obter o novo valor da corrente da I_p .

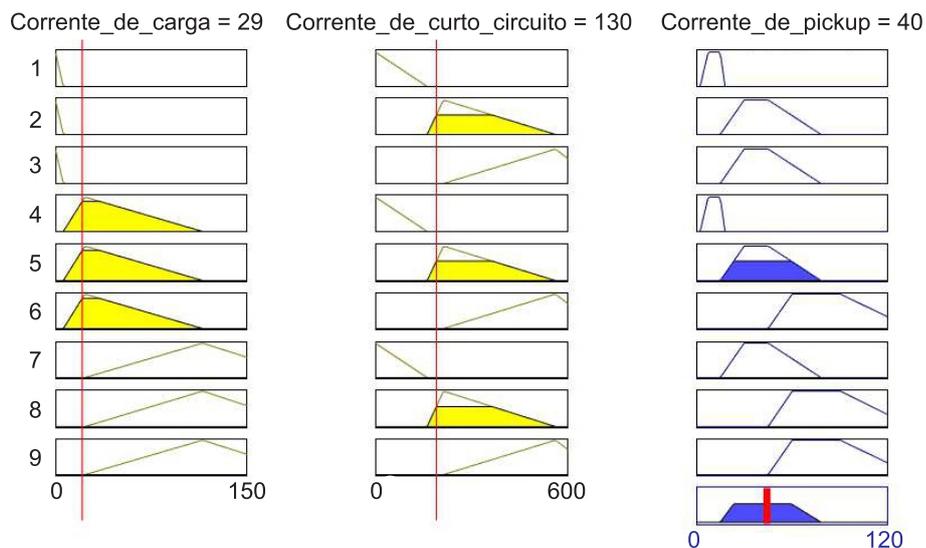
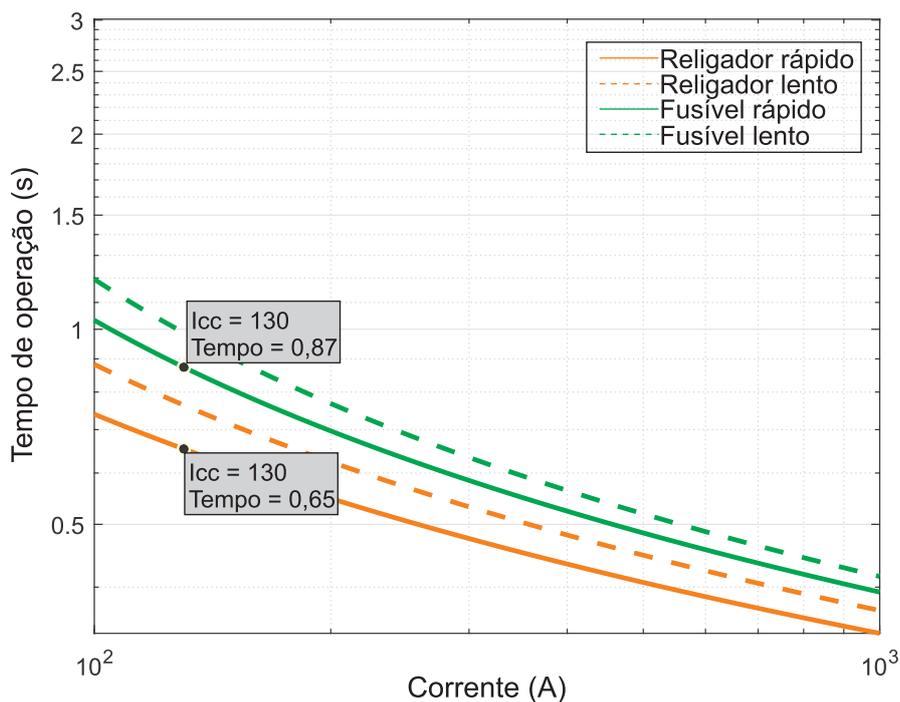


Figura 32 – Coordenograma com SPA_{fuzzy} respeitando a técnica *fuse-fase*.



Portanto, o SPA_{fuzzy} é capaz de obter dados *online* do SDEE e alcançar resultados esperados a partir da análise de sinais analógicos e digitais de religadores e relés. Ao ajustar os parâmetros de análise, avalia-se a sensibilidade do sistema a diferentes configurações e condições, demonstrando sua eficácia na coordenação de sobrecorrente, especialmente com a integração da GFV.

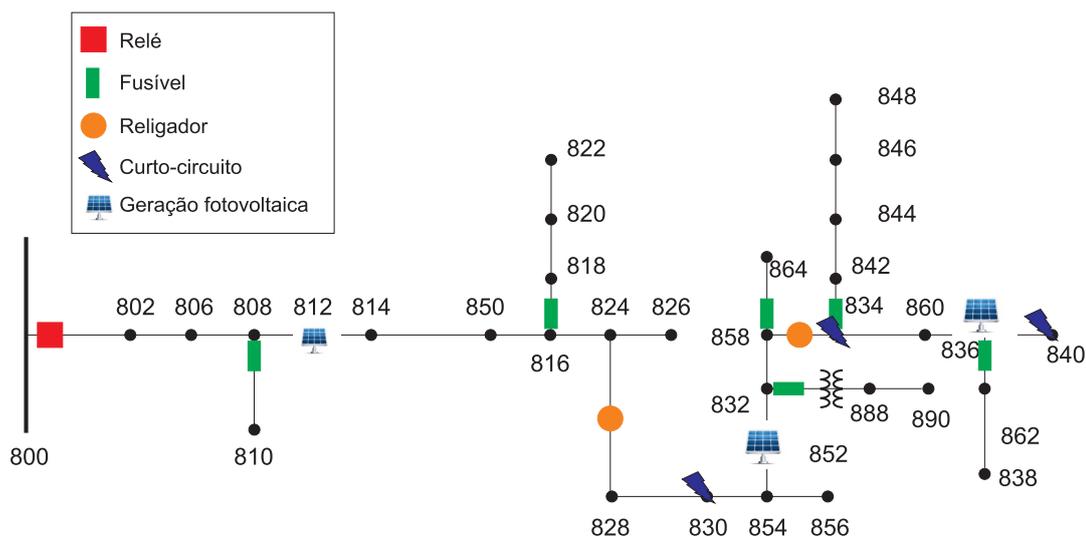
6.3 ESTUDOS DE CASO: SISTEMA-TESTE IEEE 34 BARRAS

O sistema-teste IEEE 34 barras utilizado para esta etapa do estudo está apresentado na Figura 33. Dos casos simulados, reportam-se seis casos para avaliar o impacto da GD na coordenação da proteção de sobrecorrente, considerando os seguintes Cenários de simulação referente às potências do GFV: Cenário 1: SDEE sem GFV instalado; Cenário 2: SDEE com inserção de GFV de 200 kW; Cenário 3: SDEE com inserção de GFV de 400 kW; Cenário 4: SDEE com inserção de GFV de 800 kW.

Considerando os cenários de simulação e a base de dados da Tabela 6, foram analisadas a coordenação entre os dispositivos de proteção. O esquema de proteção de sobrecorrente tradicional foi utilizado como referência, o qual possui ajustes fixos e foi parametrizado a partir das resoluções normativas e Inequações 1 - 10 (ELETROBRÁS, 1982; ENERGISA, 2017). Para os casos em que o sistema de proteção tradicional não atuou corretamente, o SPA_{fuzzy} gerou um novo valor de I_p para solucionar o problema de descoordenação.

É relevante enfatizar que, nos casos apresentados a seguir, os gráficos contendo os sinais de *trip* dos relés e religadores ao longo do tempo exibem esses sinais a partir de 0,1 segundos, em virtude dos primeiros 100 ms corresponderem ao tempo de convergência dos modelos da GFV. Quanto aos coordenogramas que apresentam as curvas de corrente dos religadores e fusíveis, a coordenação é determinada quando a diferença entre as curvas temporizadas desses elementos é de 0,2 segundos.

Figura 33 – Estudos de caso no sistema-teste IEEE 34 barras.



6.3.1 Caso 1

O primeiro caso analisado consistiu em inserir o GFV na barra 812, isto é, localizado à montante do ponto de instalação do religador 1, o qual está localizado na barra

824.

As simulações para o Cenário 1 mostram que os dispositivos de proteção foram parametrizados corretamente e estão coordenados, protegendo o SDEE e garantindo a continuidade do serviço. Do mesmo modo, a instalação do GFV para os Cenários 2, 3 e 4 também não apresentou problema de coordenação entre o relé (localizado na SE) e o religador 1 para curtos-circuitos aplicados na barra 830.

Na Figura 34 é apresentada a atuação do religador 1 para o Cenário 4, parametrizado com $I_p = 56$ A, para um curto-circuito monofásico com $R_f = 5 \Omega$ aplicado na barra 830. Nota-se que a coordenação entre relé e religador foi mantida, com o religador atuando conforme parametrizado, com uma operação rápida em 0,61 s e o sinal de *trip* do relé manteve-se em zero, representando que o mesmo não atuou. Aplicando o mesmo curto-circuito com $R_f = 20 \Omega$, tem-se um aumento no tempo de atuação da proteção de sobrecorrente (em 0,79 s), mas a coordenação de sobrecorrente também foi mantida, conforme ilustrado na Figura 35.

O desempenho da proteção de sobrecorrente tradicional observado para as simulações do Caso 1 justifica-se em virtude do GFV localizado à montante do ponto de medição do religador 1 suprir e atender as cargas locais. Assim, não ocorre alteração nos fluxos de potência do religador, independente do valor da potência do GFV, e a coordenação estabelecida é mantida.

Figura 34 – Caso 1: atuação da proteção tradicional com $R_f = 5 \Omega$.

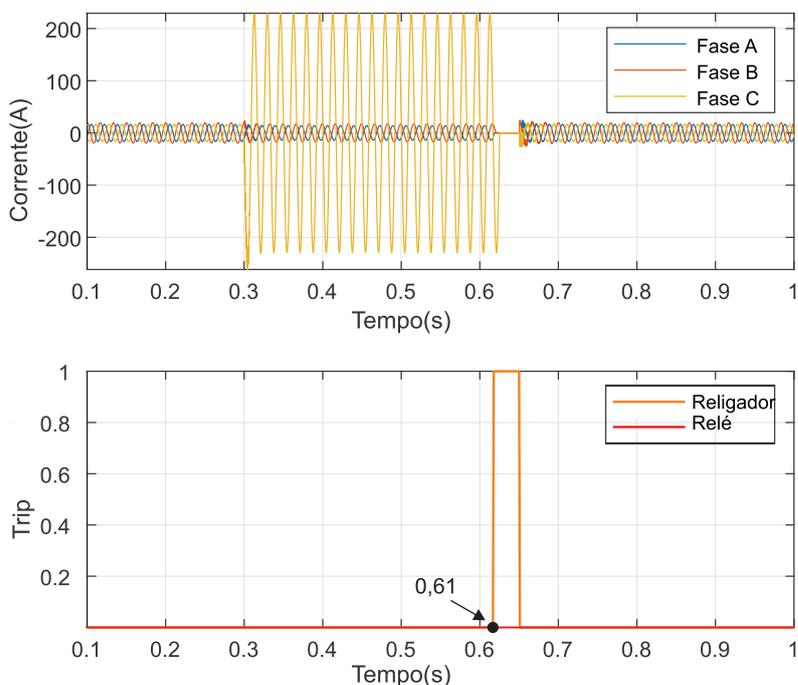
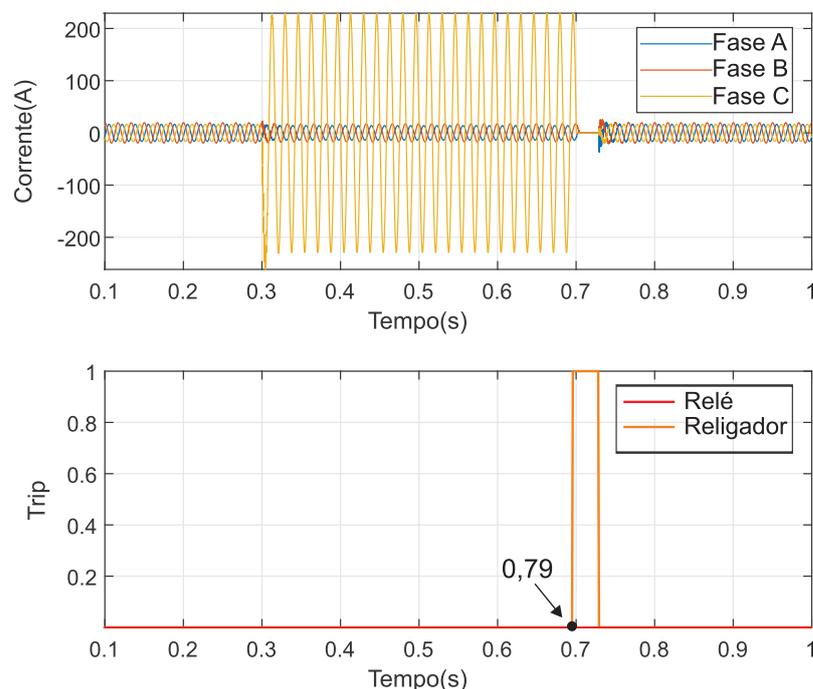


Figura 35 – Caso 1: atuação da proteção tradicional com $R_f = 20 \Omega$.

6.3.2 Caso 2

As análises para o Caso 2 consistiram em instalar o GFV na barra 852, localizado à jusante do religador 1. Para as simulações realizadas para os Cenários 1 e 2, não foram observados problemas na atuação do religador. Porém, à medida que o valor da potência injetada pelo GFV aumentou, houve descoordenação e o relé atuou primeiro que o religador, conforme apresentado na Figura 36 para um curto-circuito trifásico com $R_f = 10 \Omega$ aplicado na barra 830. Como o relé foi parametrizado como proteção de retaguarda, seu tempo de atuação é mais lento e isso pode acabar afetando o SDEE e, conseqüentemente, os consumidores associados.

Para manter o sistema de proteção coordenado, um novo valor de I_p deve ser calculado para o religador 1. Para isso, o SPA_{fuzzy} detecta que houve mudança na potência do SDEE e no estado do disjuntor associado ao dispositivo de proteção e executa a lógica *fuzzy*, o qual atualiza o valor de I_p de 56 A para 47 A. Para entendimento de como o valor de I_p é calculado a partir do *fuzzy Logic Toolbox*, apresenta-se, na Figura 37, a etapa de defuzzificação. A partir dos valores de entrada, a regra cinco foi a única que foi ativada. Assim, o método centróide calcula como saída o valor de 47 A para I_p . Portanto, ao enviar esse novo valor para o religador 1, observa-se que a coordenação entre os dispositivos de proteção de sobrecorrente é reestabelecida e o religador atuou, conforme apresentado na Figura 38. Além disso, o tempo de atuação passou de 0,74 s, quando houve atuação da proteção de retaguarda, para 0,69 s.

O desempenho observado para as simulações do Caso 2 ocorre em virtude do GFV localizado à jusante do religador 1 alterar o nível de curto-circuito total, o que modifica o valor e a direção das correntes detectadas por esse dispositivo de proteção, afetando a confiabilidade e segurança do SDEE.

Figura 36 – Caso 2: atuação da proteção tradicional.

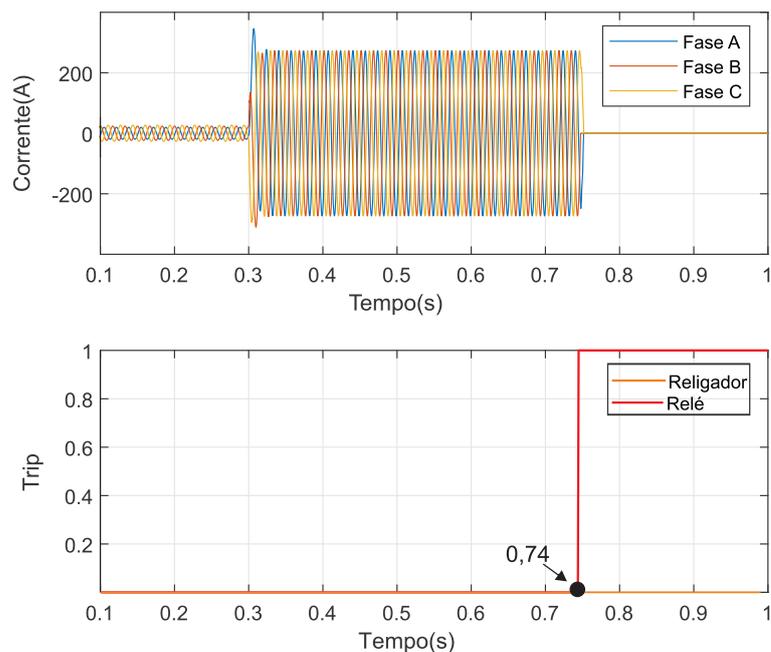


Figura 37 – Defuzzificação no *fuzzy Logic Toolbox*.

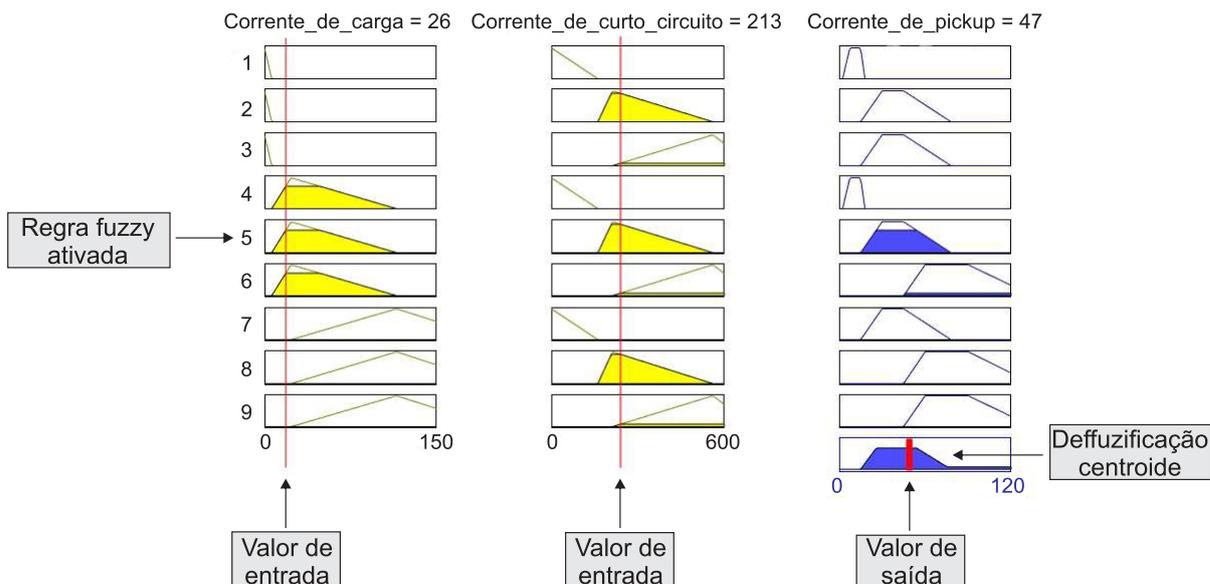
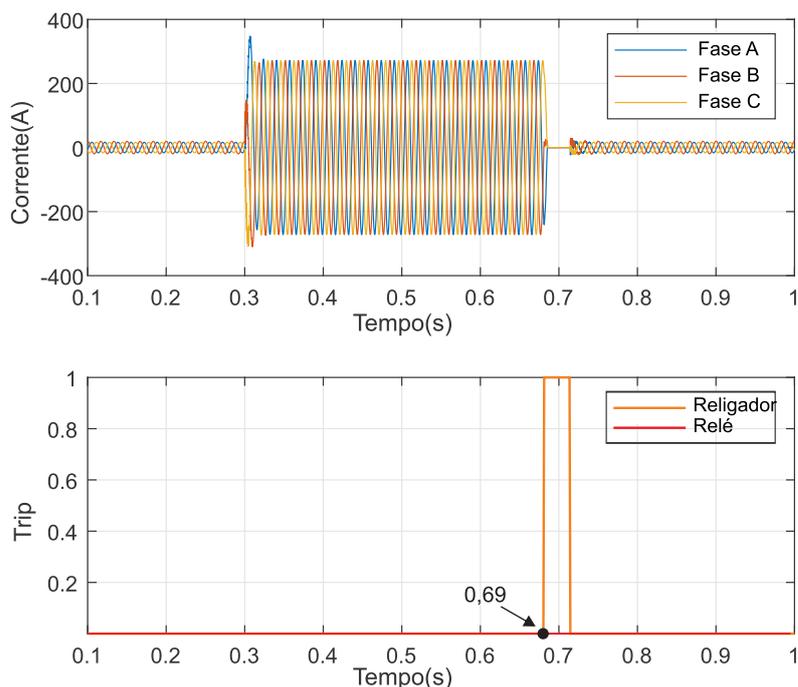


Figura 38 – Caso 2: atuação da proteção do SPA_{fuzzy}.

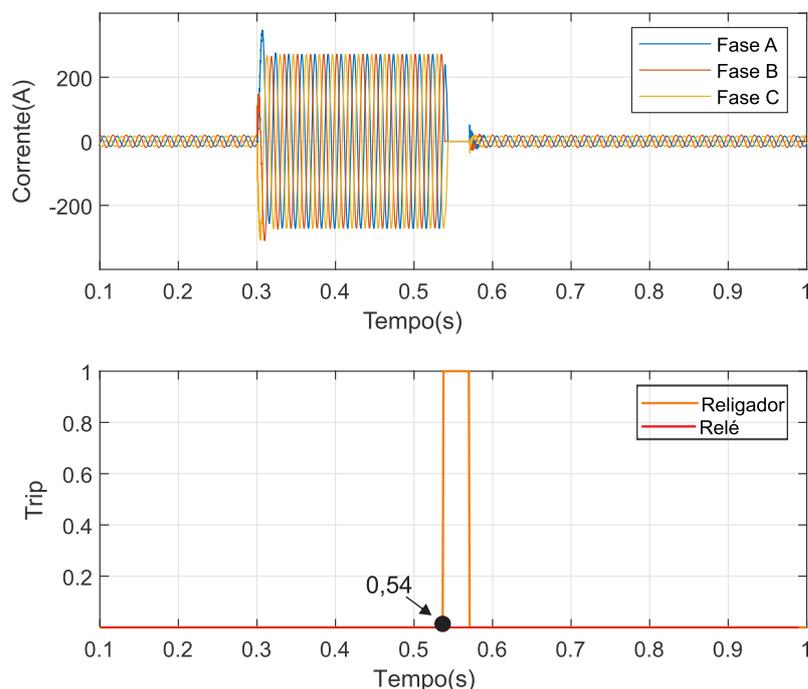
6.3.3 Caso 3

A partir do terceiro caso, serão feitas análises envolvendo o religador 2, o qual está instalado na barra 858. A coordenação com os fusíveis ocorre por meio da técnica *fuse-save*, que minimiza o tempo de interrupção para os consumidores, abrindo o religador mais rapidamente do que leva para queimar o fusível.

Ao inserir o GFV na barra 832, isto é, localizado à montante do religador 2, tem-se a mesma situação observada para o Caso 1: não houve problema de coordenação entre o religador 2 e os fusíveis instalados nas barras 858-864 e 832-888, em virtude desse GFV atender as cargas locais e não alterar os fluxos de potência do religador. Portanto, a técnica *fuse-save* foi respeitada.

A Figura 39 representa a atuação correta do religador, onde foi aplicado um curto-circuito bifásico com $R_f = 0 \Omega$ na barra 834 considerando o Cenário 3. O religador está parametrizado com I_p com valor de 48 A e atuou em 0,54 s. É importante destacar que só há a representação do *trip* do religador, porque os fusíveis são elementos eletromecânicos.

Figura 39 – Caso 3: atuação da proteção tradicional.



6.3.4 Caso 4

Para o Caso 4, o GFV foi instalado na barra 836, localizado à jusante do religador 2. Ao simular os curtos-circuitos na barra 840, observou-se que a técnica *fuse-save* foi respeitada para os Cenários 1 e 2. Entretanto, ao aumentar o valor da potência injetada pelo GFV houve descoordenação, ou seja, queima do fusível antes da atuação rápida do religador. Conforme pode ser visualizado no coordenograma da Figura 40, para um curto-circuito bifásico com $R_f = 5 \Omega$ aplicado na barra 840 com corrente de curto-circuito de 132 A, o fusível atuou na sua curva rápida com um tempo de 0,74 s.

Nesta situação, o SPA_{fuzzy} irá calcular um novo valor de I_p a fim de manter o sistema de proteção coordenado. Após detectar que houve mudança na potência do SDEE e no estado dos disjuntores, o SPA_{fuzzy} executa a lógica *fuzzy* e obtém I_p no valor de 40 A. Ao enviar esse valor para o religador 2, observa-se que a coordenação é reestabelecida e a técnica *fuse-save* deixa de ser violada, conforme apresentado na Figura 41. Como pode ser observado a partir do sinal de *trip* do religador, houve uma melhora no tempo de atuação da proteção, passando de 0,74 s para 0,62 s.

Figura 40 – Caso 4: coordenograma com violação da técnica *fuse-save*.

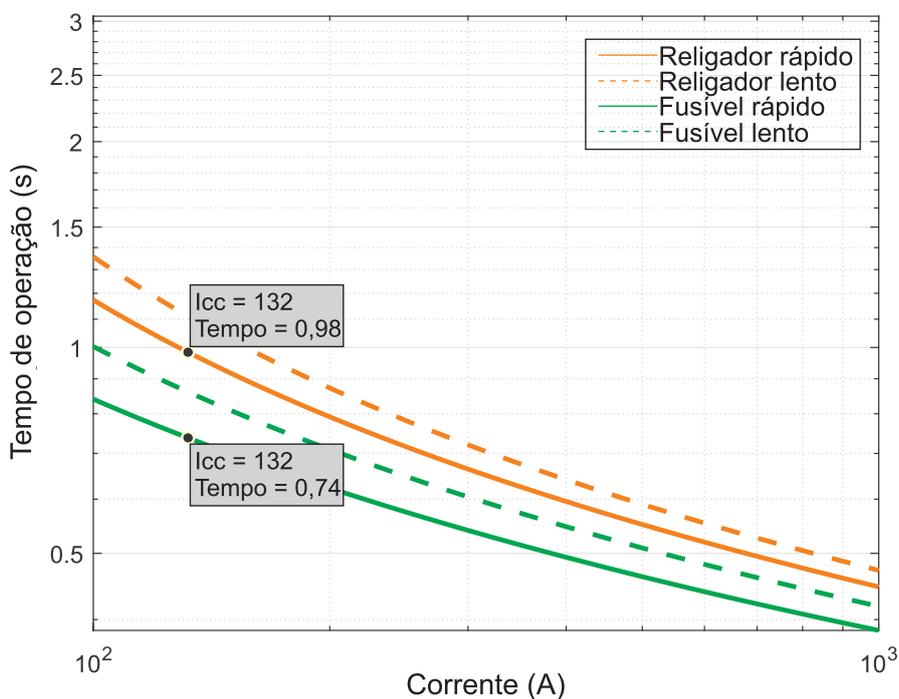
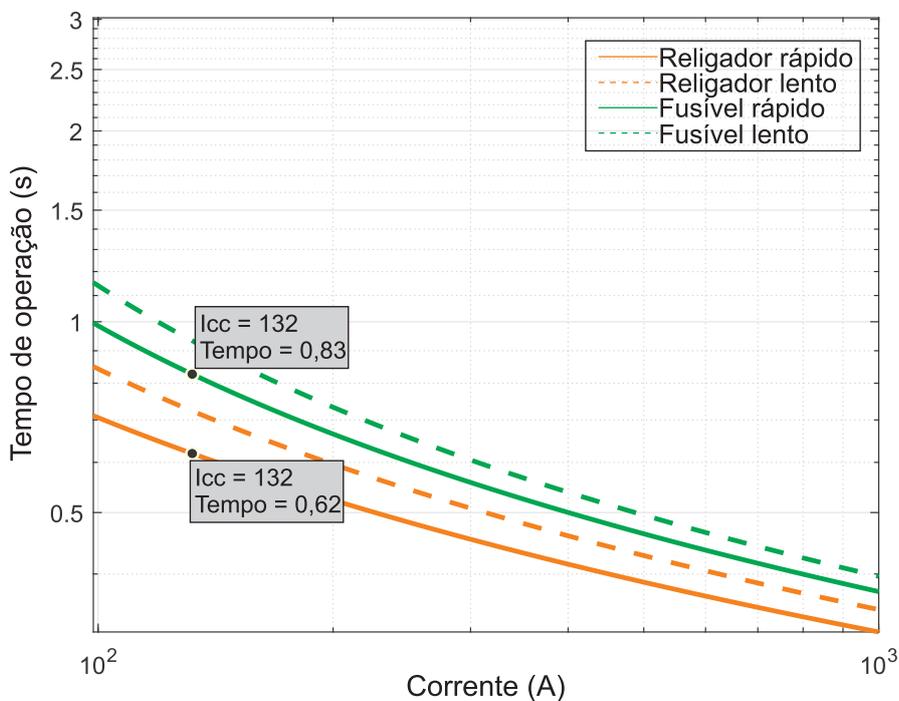


Figura 41 – Caso 4: coordenograma com SPA_{fuzzy} respeitando a técnica *fuse-save*.



6.3.5 Caso 5

Repetindo o caso anterior, mas agora com $R_f = 20\Omega$, novamente houve descoordenação, conforme pode ser visualizado no coordenograma da Figura 42, ou seja, o fusível atuou na sua curva rápida com um tempo de 0,74 s. Com o novo valor de $I_p = 40$ A calculado pelo SPA_{fuzzy} , observa-se que a coordenação é reestabelecida e a técnica *fuse-save* deixa de ser violada, conforme apresentado na Figura 43. Ao final, houve uma melhora no tempo de atuação da proteção, passando de 0,74 s para 0,62 s.

6.3.6 Caso 6

O último caso analisado considera a presença simultânea de dois GFV localizados à montante e à jusante do local de instalação do religador 2. Assim, instala-se um GFV na barra 832 (montante) e outro na barra 836 (jusante).

Para esta situação, o desempenho obtido foi semelhante aos casos observados anteriormente: i) não há problema de coordenação na proteção tradicional de sobrecorrente para o GFV à montante, uma vez que atende as cargas locais e não altera os fluxos de potência do religador 2; ii) para o GFV localizado à jusante com potência injetada a partir de 400 kW (Cenários 3 e 4), a técnica *fuse-save* foi violada, conforme apresentado no coordenograma da Figura 44. Para um curto-circuito monofásico com $R_f = 10\Omega$ aplicado na barra 834 com, o fusível atuou na sua curva rápida com um tempo

Figura 42 – Caso 5: coordenograma com violação da técnica *fuse-save*.

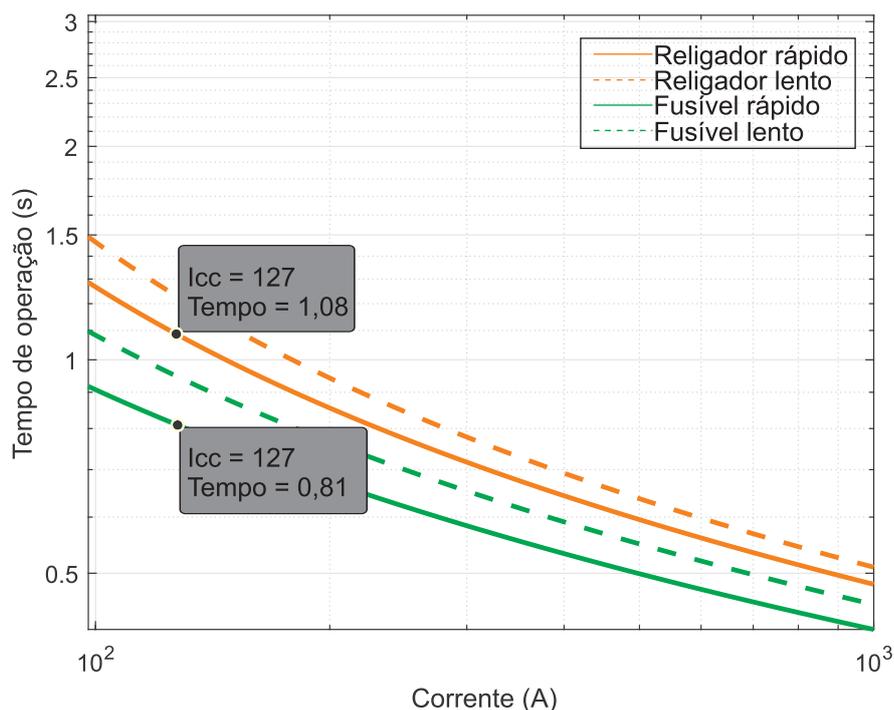
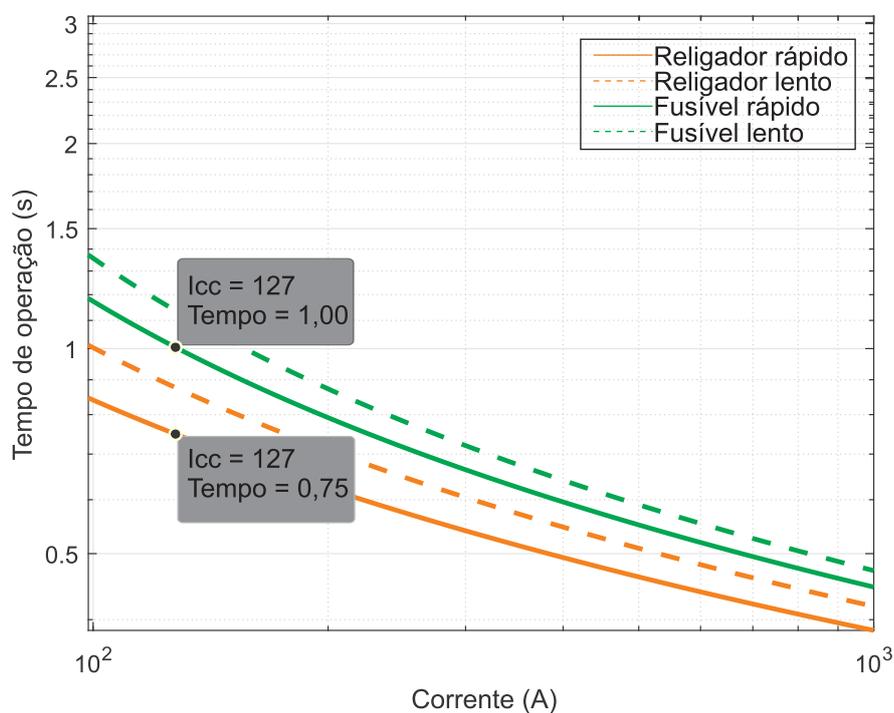


Figura 43 – Caso 5: coordenograma com SPA_{fuzzy} respeitando a técnica *fuse-save*.

de 0,81 s. Ao ajustar I_p do religador 2 com o valor de $I_p = 40$ A, o qual foi obtido no Caso 4 a partir do SPA_{fuzzy}, o problema foi solucionado e a técnica *fuse-save* respeitada, conforme representado na Figura 45. Nota-se, novamente, que houve uma melhora no tempo de atuação da proteção, passando de 0,81 s para 0,75 s.

Figura 44 – Caso 6: coordenograma com violação da técnica *fuse-save*.

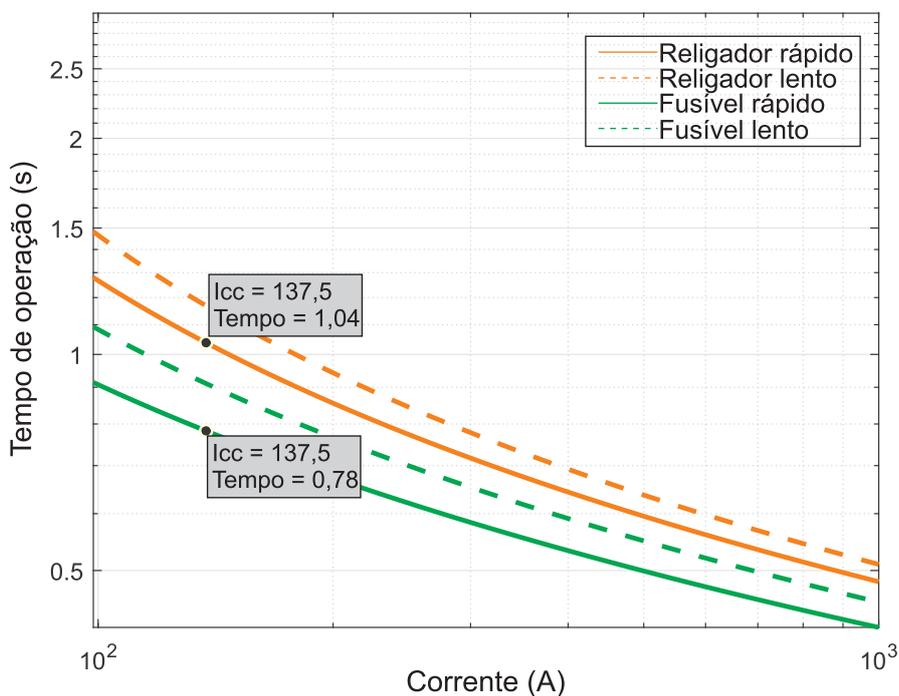
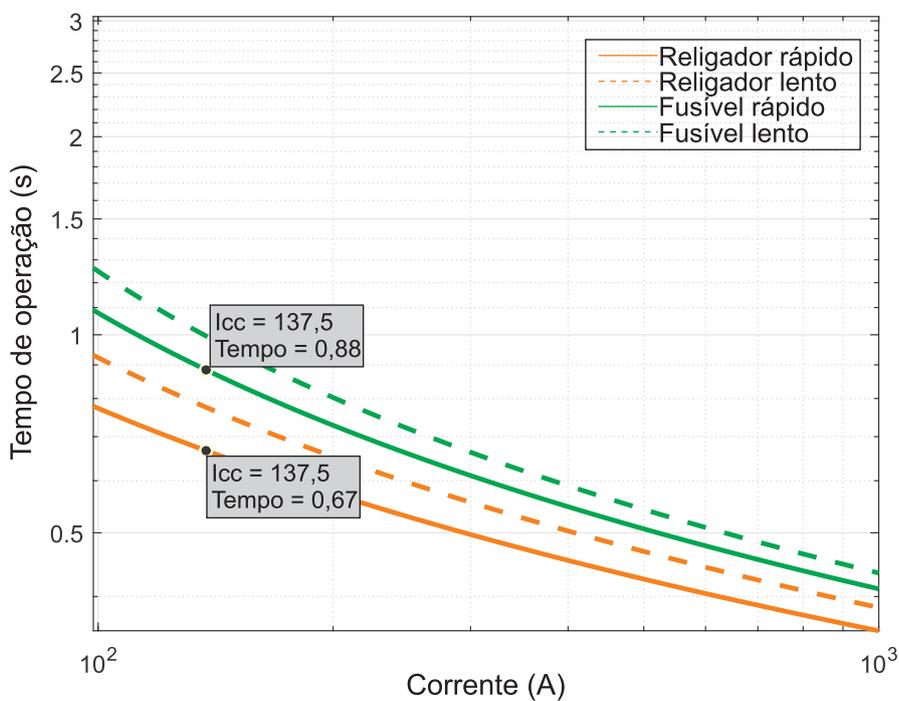


Figura 45 – Caso 6: coordenograma com SPA_{fuzzy} respeitando a técnica *fuse-save*.



6.3.7 Discussão dos Resultados

Os estudos realizados e apresentados tiveram como principal objetivo avaliar a influência do GFV na coordenação do sistema de proteção e comprovar a eficácia do SPA_{fuzzy} na resolução dos problemas identificados.

Em uma análise geral, constatou-se que quando o GFV está situado à montante do local de instalação dos religadores, não há interferência na coordenação da proteção tradicional de sobrecorrente, ao contrário dos casos em que o GFV está localizado à jusante do local de instalação dos religadores, onde foi observado que houve descoordenação da proteção de sobrecorrente em situações em que a potência do GFV era de, no mínimo, 400 kW. Isso ocorre devido à alteração do nível de curto-circuito total, o que modifica o valor e a direção das correntes detectadas pelos dispositivos de proteção, afetando a confiabilidade e segurança dos SDEE. Nessas situações, o SPA_{fuzzy} detectou as alterações no SDEE e a lógica *fuzzy* calculou os novos valores de I_p , restabelecendo a correta atuação do sistema de proteção.

É importante ressaltar que, dentre todos os casos simulados, o SPA_{fuzzy} foi capaz de manter a coordenação do sistema de proteção e, de forma geral, houve uma melhora nos tempos de atuação da proteção. Isto evidencia que as regras estabelecidas para o sistema *fuzzy* foram apropriadas, adequadamente aplicadas e que o SPA_{fuzzy} foi capaz de desempenhar sua função conforme esperado, reforçando a sua eficácia na manutenção da coordenação do sistema de proteção, contribuindo significativamente para a confiabilidade e segurança do SDEE.

A partir dos casos simulados, observou-se que as variáveis que causaram problemas na coordenação da proteção de sobrecorrente foram a potência do GFV (400 kW e 800 kW) e a localização do GFV (à jusante). Não foram observados problemas relacionados ao local de aplicação do curto-circuito e a alteração no valor de R_f , que para os casos considerados alterou apenas o tempo de atuação da proteção à medida que o seu valor aumenta.

Portanto, considerando a influência das duas variáveis relacionadas ao GFV na coordenação da proteção para os 11 tipos de falta simulados, tem-se um total de 176 casos, onde o desempenho do SPA_{fuzzy} está representado para os curtos-circuitos monofásicos, bifásicos, bifásicos-terra e trifásicos nas Figuras 46-49, respectivamente. Destaca-se que o SPA_{fuzzy} apresentou solução de 100% para os casos em que houve perda de coordenação ao calcular um novo valor de I_p .

6.3.8 Mudança de Topologia

Para ilustrar o desempenho do SPA_{fuzzy} quando há mudança de topologia no SDEE, foi considerado o Caso 5, onde ocorreu um curto-circuito severo na barra 834

Figura 46 – Desempenho do SPA_{fuzzy} para faltas monofásicas.

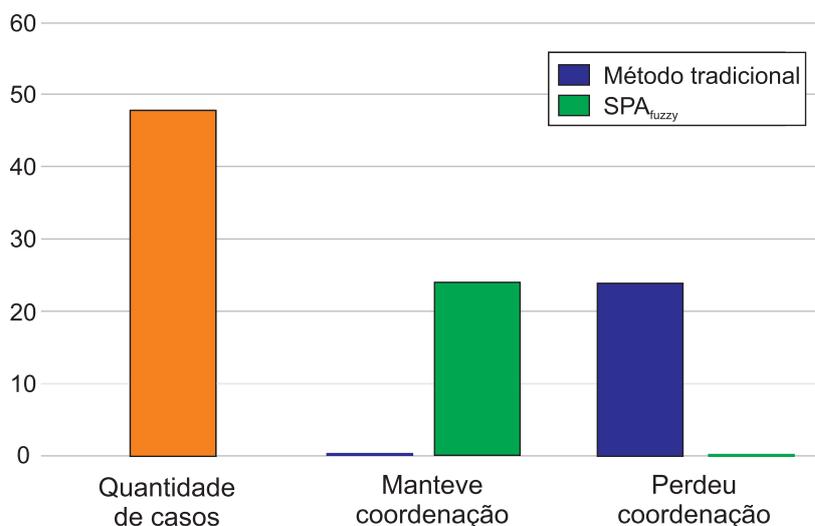


Figura 47 – Desempenho do SPA_{fuzzy} para faltas bifásicas.

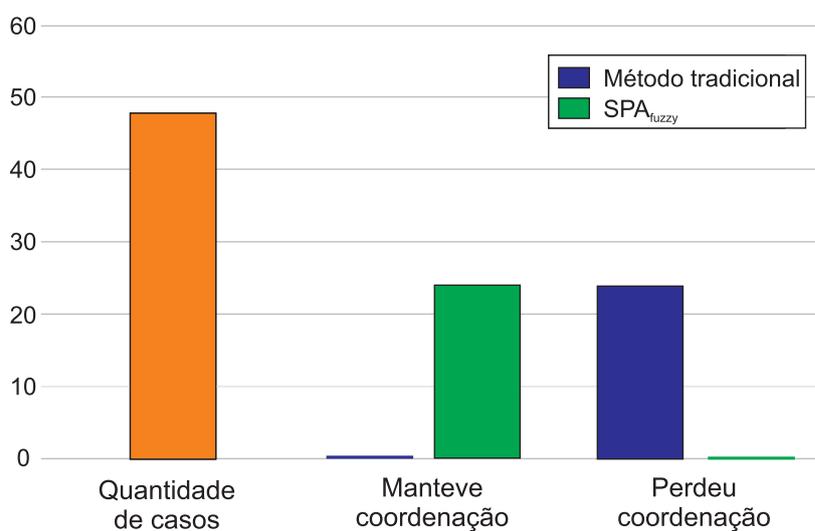


Figura 48 – Desempenho do SPA_{fuzzy} para faltas bifásicas-terra.

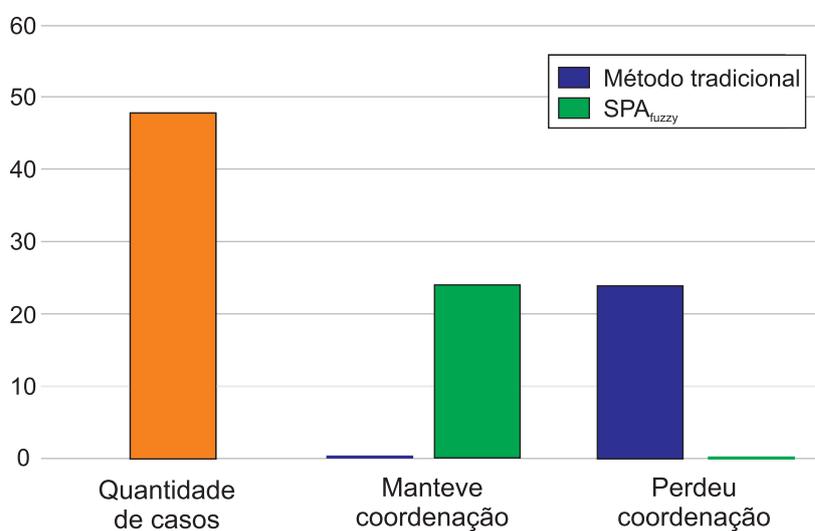
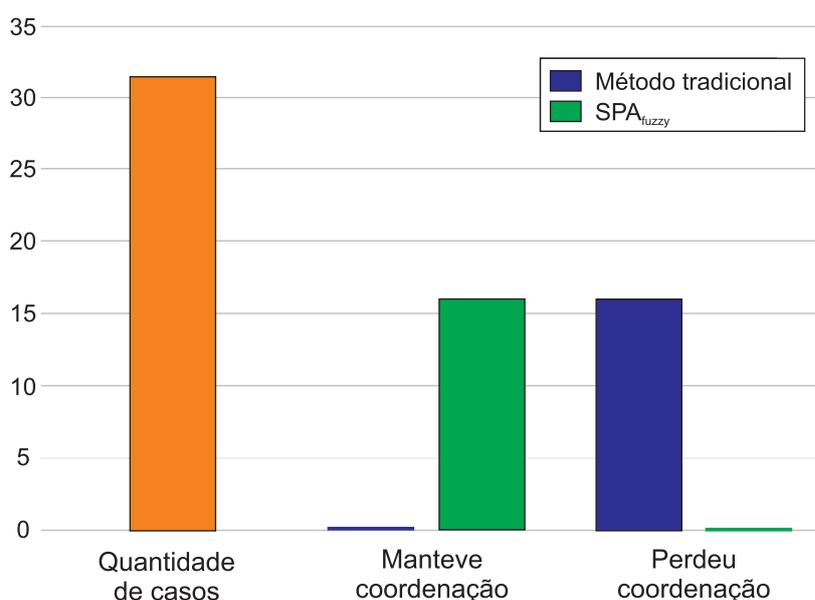


Figura 49 – Desempenho do SPA_{fuzzy} para faltas trifásicas.

sendo necessário abrir em definitivo o religador 2 para ser realizada uma manutenção nesse trecho, tirando-o de serviço e também as barras adjacentes, ou seja, o sistema tem seu funcionamento até o trecho das barras 858-864, resultando em mudanças nas características do SDEE, como nos níveis de corrente e de potência, por exemplo. Ao detectar mudança na topologia do sistema, a Equação 21 indicou a abertura dos disjuntores fazendo com que o SPA_{fuzzy} recalcule os ajustes do sistema de proteção.

Para verificar a coordenação da proteção de sobrecorrente nesse novo cenário, considerou-se novamente o Caso 2. Ao instalar um GFV de 400 kW na barra 852 e aplicar um curto-circuito trifásico na barra 830, houve descoordenação, pois o relé atuou antes do religador 1, o qual estava parametrizado com $I_p = 51$ A, conforme ilustrado na Figura 50. Assim, o SPA_{fuzzy} recalculou os ajustes do religador 1 e reestabeleceu a coordenação do sistema de proteção, conforme apresentado na Figura 51, ao atualizar o valor de I_p para 44 A.

6.3.9 Variação no Carregamento do Alimentador

Uma variável importante a ser considerada no problema de coordenação dos dispositivos de proteção de sobrecorrente é a carga do sistema de distribuição (P_{carga}). Em um caso real, a potência de carga demandada pelas unidades consumidoras varia constantemente. De acordo com a Tabela 8, que contém informações sobre a carga do SDEE (P_{carga}), corrente de carga (I_c) e corrente de *pickup* (I_p) dos religadores, foram avaliados 12 casos, variando a carga do alimentador em 50%, 75% e 100%, considerando os quatro cenários de simulação, representados pela potência do GFV da Tabela 6.

Ao observar os dados contidos na Tabela 8, nota-se que, comparando a atuação

considerando ou não o SPA_{fuzzy}, existem situações em que as I_p podem ser extremamente altas em relação às correntes de carga medidas pelos dispositivos de proteção. Para o Caso 5, I_p do religador 2 (I_{p2}) é 2,25 vezes maior que sua corrente de carga (I_{c2}) e para o Caso 12, I_p do religador 1 (I_{p1}) é 5,05 vezes maior do que a corrente de carga medida por este dispositivo (I_{c1}).

Este desempenho foi observado para todos os casos analisados e essa diferença resulta em baixa sensibilidade na operação do sistema de proteção, fazendo com que os

Figura 50 – Mudança de topologia: atuação da proteção tradicional.

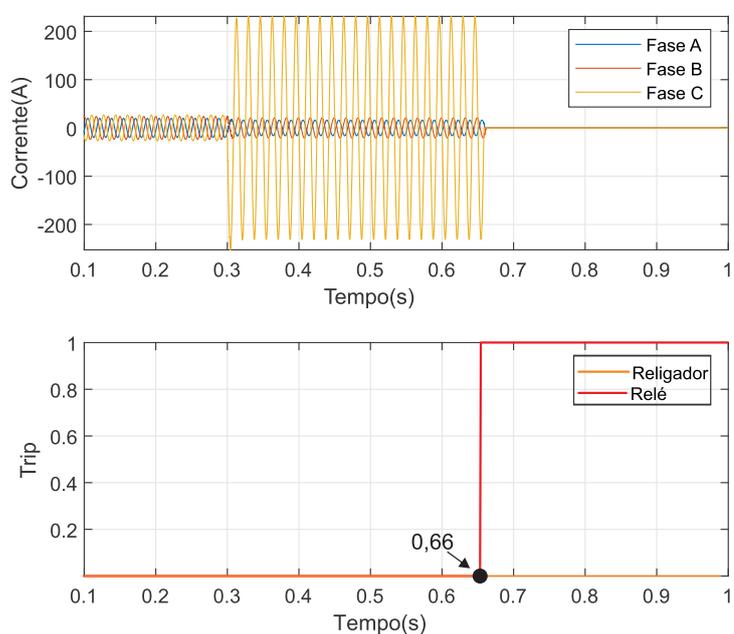
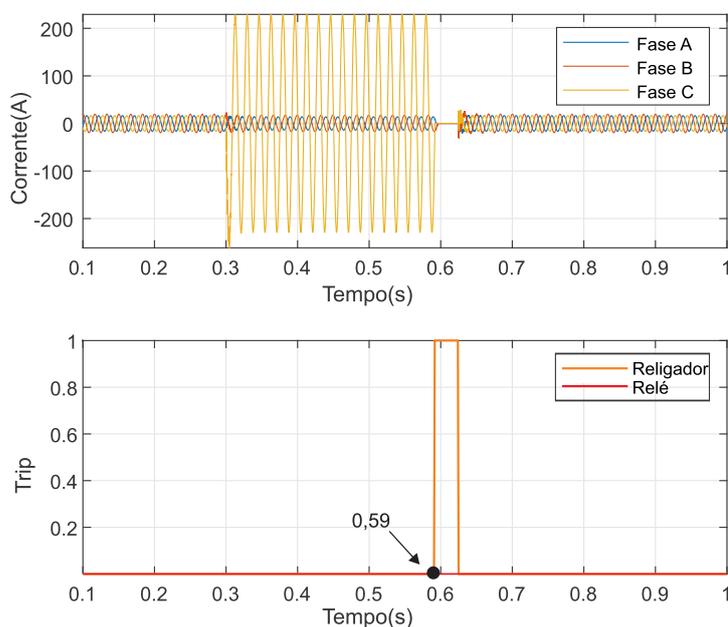


Figura 51 – Mudança de topologia: atuação da proteção do SPA_{fuzzy}.



dispositivos de sobrecorrente não atuem para correntes de curto-circuito baixas e ocorra a descoordenação entre os elementos de sobrecorrente. Com o uso do SPA_{fuzzy} proposto, observa-se que as I_p dos religadores 1 e 2 (I'_{p1} e I'_{p2} , respectivamente) possuem valores mais próximos das suas correntes de carga, adaptando assim a sensibilidade da proteção de acordo com a variação de carga considerada.

Conclui-se, portanto, que o SPA_{fuzzy} pode realizar um ajuste otimizado e dinâmico das I_p de acordo com as mudanças no nível de potência injetada pelo GFV e pela P_{carga} , permitindo melhorias na sensibilidade e no tempo de atuação do sistema de proteção.

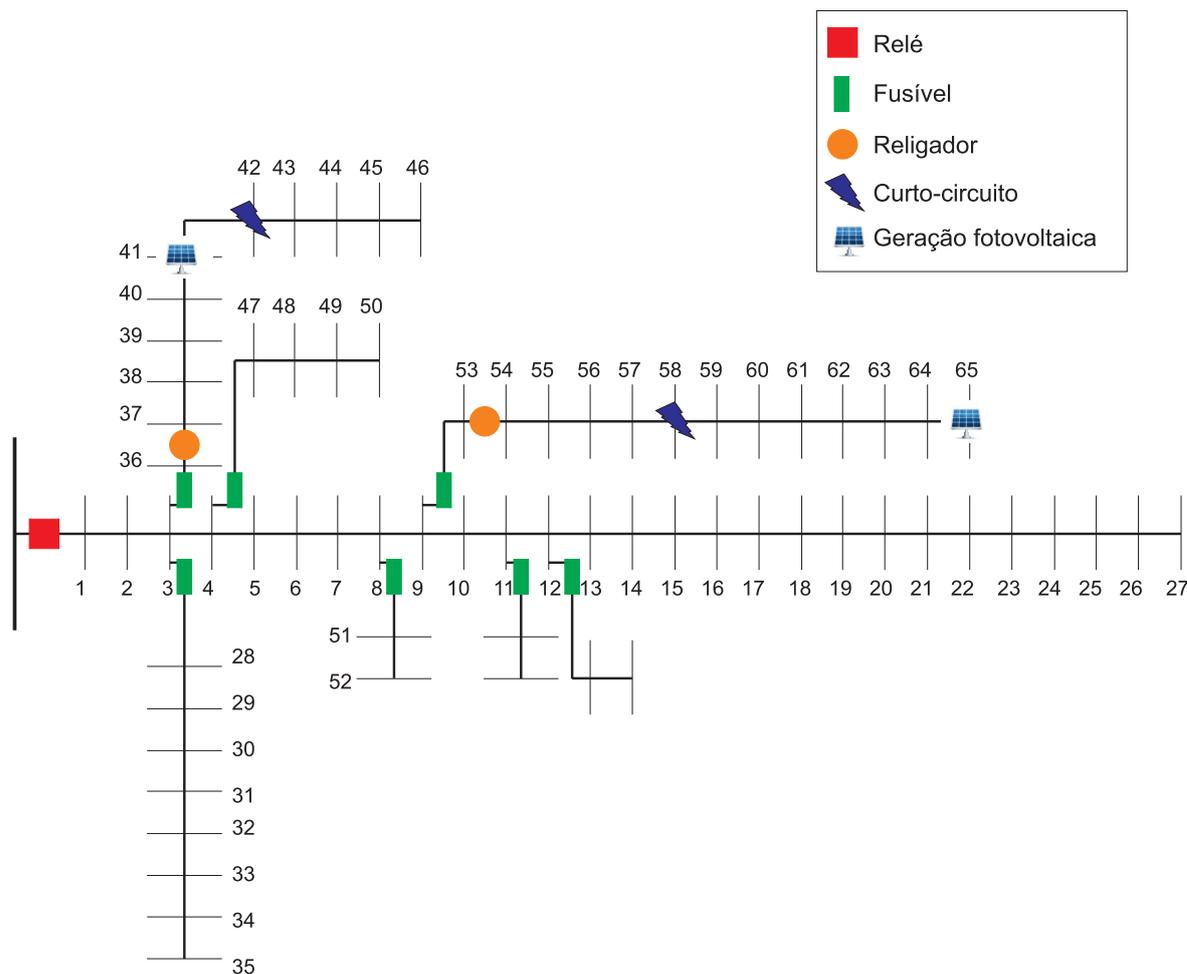
Tabela 8 – Variação no carregamento do alimentador.

Cenário	Caso	P_{carga} (%)	I_{c1} (A)	I_{c2} (A)	I_{p1} (A)	I_{p2} (A)	I'_{p1} (A)	I'_{p2} (A)
1	1	100	34.8	30.4	56	48	47	40
	2	75	28.3	25.1	56	48	38.3	31.4
	3	50	19.6	15.9	56	48	26.4	19
2	4	100	29.1	26.2	56	48	47	40
	5	75	24.7	21.4	56	48	33.5	26
	6	50	16.9	14.3	56	48	23	23.1
3	7	100	24.2	21.5	56	48	47	40
	8	75	19.5	16.7	56	48	26.5	20.1
	9	50	13.6	11.6	56	48	18.1	13.9
4	10	100	21.9	17.8	56	48	47	40
	11	75	16.4	11.9	56	48	25	14.3
	12	50	11.1	9.2	56	48	15.3	11.2

6.4 ESTUDOS DE CASO: SISTEMA-TESTE IEEE 69 BARRAS

As simulações realizadas no sistema-teste IEEE 69 barras mostrado na Figura 52, visam verificar o desempenho do SPA_{fuzzy} para os casos críticos em um sistema de maior porte. Conforme observado nas simulações no sistema-teste IEEE 34 barras, houve problema na coordenação de sobrecorrente para o GFV localizado à jusante do local de instalação dos dispositivos de proteção e com potência nominal a partir de 400 kW. Portanto, foram considerados os mesmos cenários utilizados para o sistema-teste IEEE 34 barras e reportados quatro casos que se inserem nesse contexto, os quais são apresentados a seguir.

Figura 52 – Estudos de caso no sistema-teste IEEE 69 barras.



6.4.1 Caso 1

O primeiro caso analisado consistiu em inserir o GFV na barra 41, isto é, localizado à jusante do ponto de instalação do religador 1, o qual está localizado na barra 36.

Inicialmente, verificou-se que não houve perda de coordenação entre o relé instalado na SE e o religador 1 ao aplicar um curto-circuito na barra 42 para os Cenários 1 e 2. Para os Cenários 3 e 4, houve descoordenação e a proteção de retaguarda atuou primeiro do que a proteção principal. Na Figura 53 apresenta-se o caso com GFV de 400 kW para um curto-circuito monofásico com $R_f = 5\Omega$ aplicado na barra 42.

O religador 1 está parametrizado com I_p no valor de 72 A e, para manter o sistema coordenado, o SPA_{fuzzy}, ao detectar que houve mudança na potência do SDEE e no estado do disjuntor associado ao dispositivo de proteção, calcula e envia para o religador 1 I_p no valor de 59 A. Então, com esse novo valor de corrente, a coordenação da proteção de sobrecorrente é reestabelecida e o religador atua corretamente, conforme apresentado na Figura 54. Nota-se que também houve melhora no tempo de atuação da proteção de 0,59 s para 0,52 s.

Figura 53 – Caso 1: atuação da proteção tradicional.

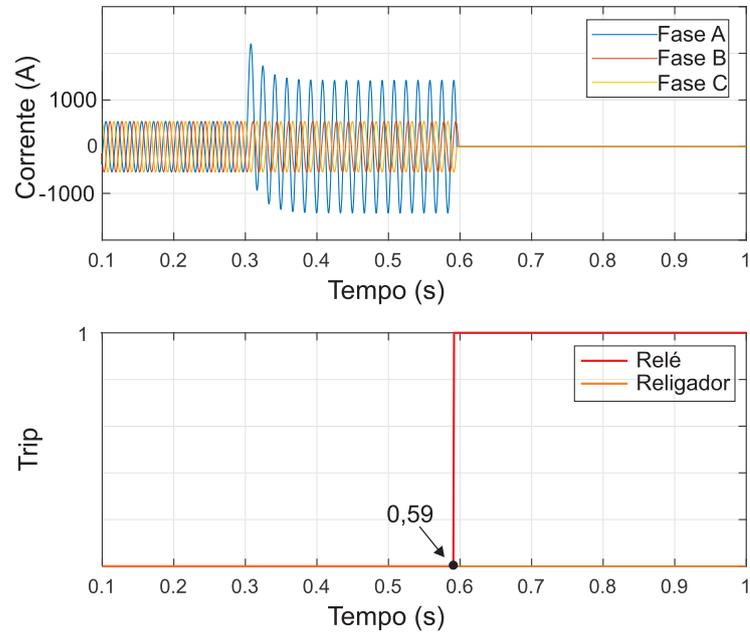
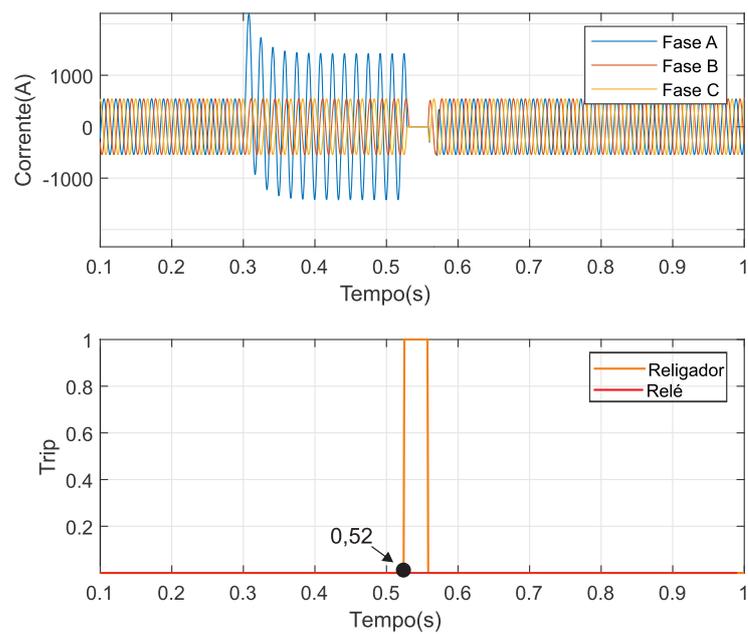


Figura 54 – Caso 1: atuação da proteção com SPA_{fuzzy}.



6.4.2 Caso 2

Para o segundo caso serão feitas análises envolvendo o religador 2, o qual está instalado na barra 53 e que está coordenado com os fusíveis por meio da técnica *fuse-save*. O GFV foi instalado à jusante do religador 2 na barra 65.

Ao simular os curtos-circuitos na barra 58, observou-se que a técnica *fuse-save* foi respeitada para os Cenários 1 e 2. Entretanto, houve descoordenação para os Cenários 3 e 4, ou seja, queima do fusível antes da atuação rápida do religador. Conforme pode ser visualizado no coordenograma da Figura 55, para um GFV com potência de 800 kW e curto-circuito trifásico com $R_f = 5\Omega$ aplicado na barra 58 com corrente de curto-circuito de 363,5 A, o fusível atuou na sua curva rápida com um tempo de 0,79 s.

Ao executar o SPA_{fuzzy}, obtém-se um novo I_p . Inicialmente, o religador 2 estava parametrizada com I_p no valor de 80 A e, ao ser enviado o novo valor de 63 A calculado pelo SPA_{fuzzy} para o religador 2, observa-se que a coordenação é reestabelecida e a técnica *fuse-save* deixa de ser violada, conforme apresentado na Figura 56. Como pode ser observado a partir do coordenograma, houve uma melhora no tempo de atuação da proteção, passando de 0,79 s para 0,73 s.

Figura 55 – Caso 2: coordenograma com violação da técnica *fuse-save*.

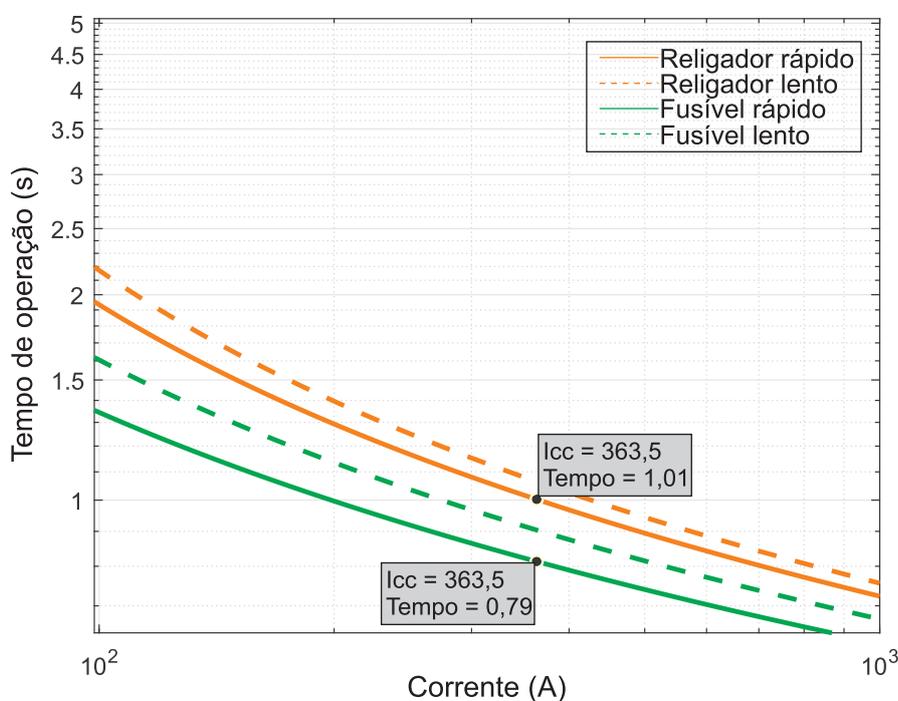
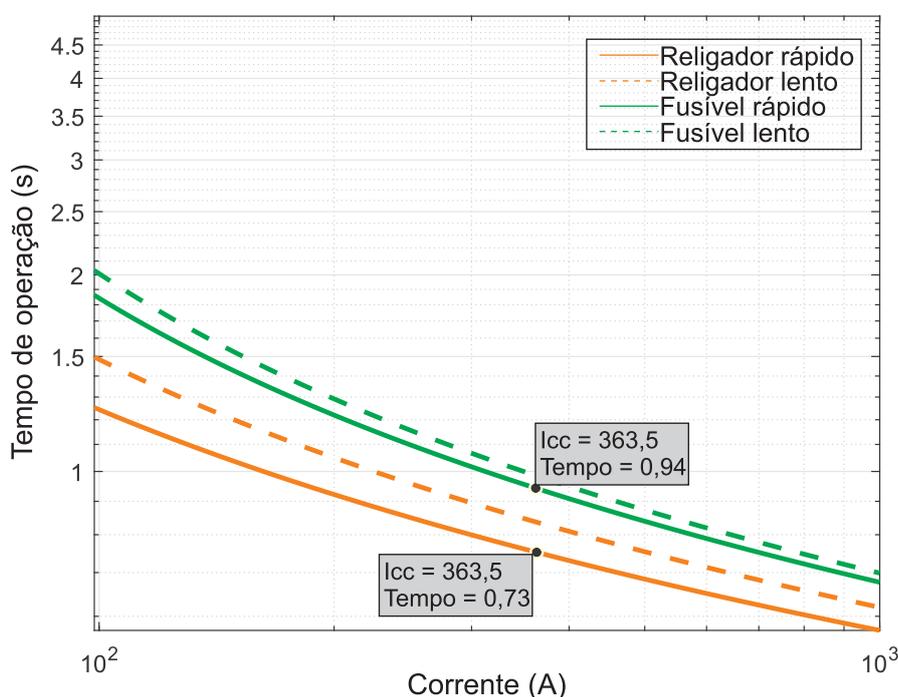


Figura 56 – Caso 2: coordenograma com SPA_{fuzzy} respeitando a técnica *fuse-save*.

6.4.3 Caso 3

O último caso analisado considera a presença simultânea de dois GFV localizados à montante e à jusante do local de instalação do religador 2. Assim, instala-se um GFV na barra 8 (montante) e outro na barra 65 (jusante).

O desempenho obtido foi semelhante ao observado para o Caso 5 do sistema-teste IEEE 34 barras, isto é, não ocorreu problema de coordenação para o GFV à montante, enquanto que a técnica *fuse-save* foi violada para o GFV localizado à jusante com potência injetada a partir de 400 kW, conforme apresentado no coordenograma da Figura 57 para um curto-circuito bifásico-terra com $R_f = 20\Omega$ aplicado na barra 58, onde o fusível atuou na sua curva rápida com um tempo de 0,85 s.

Ao ajustar I_p do religador 2 com o valor de $I_p = 63$ A, o qual foi obtido no Caso 2 a partir do SPA_{fuzzy}, o problema foi solucionado e a técnica *fuse-save* respeitada, conforme apresentado na Figura 58. Novamente ocorreu uma melhora no tempo de atuação da proteção, passando para 0,77 s.

Portanto, ao avaliar os casos críticos para a coordenação da proteção de sobrecorrente do SDEE em um sistema de maior porte, conclui-se que o SPA_{fuzzy} é robusto e eficaz, sendo capaz de obter novos valores de I_p e melhores tempos de atuação da proteção, atendendo aos requisitos da filosofia da proteção.

Figura 57 – Caso 3: coordenograma com violação da técnica fuse-save.

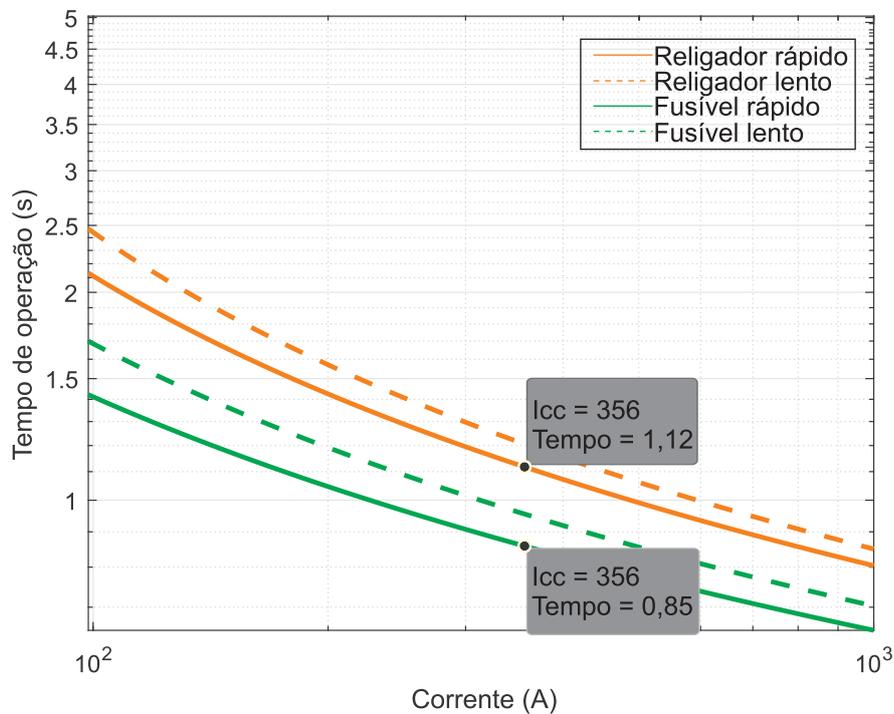
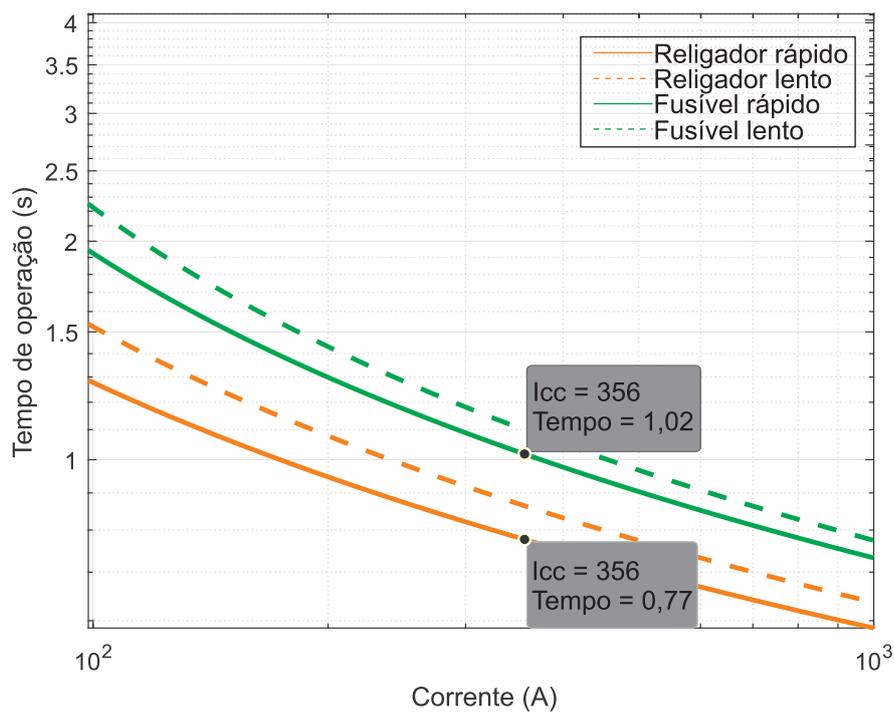


Figura 58 – Caso 3: coordenograma com SPA_{fuzzy} respeitando a técnica fuse-save.



6.5 COMPARAÇÃO COM A LITERATURA

Para fins de comparação, realizou-se uma comparação direta entre alguns dos métodos analisados anteriormente no Capítulo 3 e o SPA_{fuzzy}, apresentados na Tabela 9. Nesta Tabela, foram consideradas como variáveis de análise a coordenação da proteção, o tamanho do sistema-teste utilizado, a utilização e o tipo da GD e se é realizado o cálculo *online* dos parâmetros.

Ao analisar os dados da Tabela 9, observa-se que os trabalhos de FRACALOSSO *et al.* (2020) e YOUSAF *et al.* (2022b), embora considerem os três elementos na coordenação da proteção de sobrecorrente, divergem ao não realizar o cálculo *online* dos ajustes da proteção, aspecto crucial diante das frequentes mudanças topológicas em alimentadores com GD. MENDES *et al.* (2021), por sua vez, além de não realizar os ajustes da proteção de forma *online*, limita-se à proteção via relé, da mesma forma que os demais autores que restringem-se à análise do desempenho do método em alimentadores de pequeno porte, sem abranger sistemas mais robustos e com múltiplos componentes. Em contraste, o método proposto preenche essas lacunas, destacando-se por considerar um sistema de proteção completo e adaptado à dinâmica dos alimentadores com GD fotovoltaica.

Tabela 9 – Comparação entre o método proposto e outros métodos presentes na literatura.

Método	Coordenação	Geração Distribuída	Sistema-teste	Cálculo <i>online</i> dos parâmetros
PUJANTARA e ABDILLAH (2012)	Relé	-	26 barras	Sim
KUMAR <i>et al.</i> (2015)	Relé	-	34 barras	Sim
MOMESSO <i>et al.</i> (2019)	Relé	Eólica	13 barras	Sim
NASCIMENTO (2020)	Relé	Máquina síncrona	34 barras	Sim
FRACALOSSO <i>et al.</i> (2020)	Fusível, relé e religador	GFV	13 barras	-
MENDES <i>et al.</i> (2021)	Relé	Fonte de corrente	13 barras	-
YOUSAF <i>et al.</i> (2022b)	Fusível, relé e religador	-	13 barras	-
VASCONCELOS <i>et al.</i> (2022)	Relé	GFV	13 e 34 barras	Sim
BARRADAS (2022)	Relé	Máquina síncrona	13 e 135 barras	Sim
Proposto	Fusível, relé e religador	GFV	34 e 69 barras	Sim

Fonte: Autoria própria.

6.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta seção foram apresentados os impactos da GD na coordenação da proteção do SDEE. A partir de análises considerando quatro cenários de simulação, observou-se

que em todos os casos analisados houve problema de coordenação usando o esquema de proteção tradicional para o GFV localizado à jusante do local em que o dispositivo de proteção estava instalado com valor de potência a partir de 400 kW. Assim, o SPA_{fuzzy} garantiu a coordenação e a seletividade entre os dispositivos de proteção que compõem o SDEE.

Além de garantir coordenação e seletividade, destaca-se ainda que o SPA_{fuzzy} permite a obtenção dos ajustes das unidades de sobrecorrente a partir da lógica *fuzzy*, que visa ajustar automaticamente as funções de proteção às condições operacionais em um processo mais simples e rápido que o utilizado pela técnica tradicional. Portanto, conclui-se que o SPA_{fuzzy} proposto é robusto, sensível e mais rápido que outras soluções da mesma categoria, garantindo seletividade de proteção adequada, mesmo na presença de unidades de GD no SDEE.

CONCLUSÕES

O Sistema de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE) tradicional possui configuração radial com fluxo de potência unidirecional no sentido da fonte primária alimentando as cargas à jusante. Com essa configuração, os equipamentos de proteção instalados ao longo do alimentador são projetados seguindo a direcionalidade de fluxo e correntes de curto-circuito calculados previamente. Todavia, com o avanço da tecnologia, o advento das redes inteligentes e a redução do custo da instalação da geração distribuída baseada na energia solar fotovoltaica, geradores fotovoltaicos estão cada vez mais presentes nos sistemas de distribuição. Como resultado, observam-se a presença de fluxos de potências bidirecionais que podem ocasionar atuação indevida dos dispositivos de proteção de sobrecorrente. Com isso, o sistema de proteção convencional já não consegue atender aos seus propósitos, o que requer a pesquisa por novos modos de coordenação. Esta Tese enquadra-se nesse contexto e apresentou um novo esquema para coordenar os dispositivos de proteção de um sistema de distribuição com a presença de geradores fotovoltaicos baseado no uso combinado de proteção adaptativa e lógica *fuzzy* denominado SPA_{fuzzy}.

Com a ascensão das redes inteligentes podem ocorrer mudanças significativas na topologia dos SDEE. Realizar estudos sobre a coordenação da proteção e reformular as práticas atuais dos sistemas de distribuição constituem temas atuais e importantes no estado da arte, especialmente no sistema de proteção de sobrecorrente, uma das áreas mais impactadas no cenário atual.

Na prática, as reformulações dos dispositivos de proteção de sobrecorrente exigem novos estudos de parametrização, o que consome um tempo considerável. A repetição desses estudos de coordenação e seletividade pode, portanto, tornar-se inviável. Para facilitar esta etapa, foi proposto um sistema de proteção adaptativa com lógica *fuzzy* capaz de obter novos valores de corrente de *pickup* por meio de regras definidas a partir do conhecimento do especialista. Baseado na arquitetura, os sistemas de proteção adaptativa podem ser classificados em centralizado, distribuído ou descentralizado. Selecionou-se a arquitetura centralizada, a qual dispõe de um único computador localizado na subestação que controla todo o sistema de proteção. O sistema proposto monitora continuamente o sistema, lendo os canais digitais e analógicos, mais especificamente o *status* dos disjuntores e sinais de tensão e corrente na região monitorada pelos dispositivos digitais. Mudanças abruptas nessas variáveis são tomadas como mudanças topológicas no SDEE. Neste caso, o sistema de proteção recalcula automaticamente as

novas configurações de relé/religador do sistema monitorado a partir da lógica *fuzzy*, a ferramenta matemática responsável por realizar o cálculo dos ajustes dos dispositivos de sobrecorrente e tem como variáveis de entrada a corrente de carga e a corrente de curto-circuito, enquanto que a variável de saída é a corrente de *pickup*. Ao final, após realizar as etapas de Fuzzificação, Inferência e Defuzzificação, os novos ajustes são enviados para os dispositivos digitais do sistema a partir do padrão IEC 61850 baseado em Ethernet. O SPA_{fuzzy} foi concebido de modo a adaptar-se às mudanças no sistema de distribuição e manter a coordenação e seletividade da proteção de sobrecorrente e visando melhorar a confiabilidade e segurança do SDEE.

Para validar e avaliar o desempenho do SPA_{fuzzy}, foram elaborados quatro cenários de simulação, os quais consideraram a inserção e a variação da potência dos geradores fotovoltaicos e foram simulados na plataforma Simulink/MATLAB[®] a partir de uma metodologia que foi elaborada para ser aplicada em dois sistemas-testes do IEEE: um de 34 barras e outro de 69 barras. Construiu-se uma base de dados, totalizando 2112 casos, levando em consideração os locais de aplicação dos curtos-circuitos, a variação do tipo de curto-circuito e da resistência de falta, a potência e a localização dos geradores fotovoltaicos. Para efeito de comparação, o esquema de proteção de sobrecorrente tradicional parametrizado a partir das resoluções normativas foi utilizado como referência.

Mediante os resultados obtidos, constatou-se que houve problema na coordenação de sobrecorrente para os casos em que o gerador fotovoltaico estava localizado à jusante da instalação do dispositivo de proteção e com potência a partir de 400 kW. Para todos os casos simulados que apresentaram esse problema de coordenação, observou-se que o SPA_{fuzzy} foi capaz de manter a coordenação do sistema de proteção a partir da parametrização realizada pelas correntes de *pickup* obtidas pelo SPA_{fuzzy}, mesmo com variação do tipo de curto-circuito, níveis de potência do gerador fotovoltaico e carregamento do sistema. Além disso, houve uma melhora nos tempos de atuação da proteção, atendendo ao requisito de velocidade da filosofia de proteção. O SPA_{fuzzy} também mostrou-se eficaz para mudanças na topologia e variação no carregamento do alimentador, sendo capaz de manter a coordenação da proteção ao recalcular novos valores de corrente de *pickup* para os dispositivos de proteção.

Ao final e diante dos resultados obtidos, constatou-se que o sistema proposto é promissor e que o SPA_{fuzzy} desempenhou efetivamente sua função, contribuindo significativamente para a coordenação do sistema de proteção e, conseqüentemente, para a confiabilidade e segurança do SDEE, sendo robusto, sensível e mais rápido que outras soluções da mesma categoria, garantindo seletividade de proteção adequada. Destaca-se também que a automação do processo de parametrização da proteção de sobrecorrente direcional torna o sistema de proteção mais seguro.

Diante do exposto, visando consolidar o SPA_{fuzzy}, propõe-se como continuação dos estudos realizados nesta Tese a realização das seguintes etapas:

- Avaliar o método proposto considerando grupos de ajustes já definidos, visando aproveitar a capacidade dos relés e religadores digitais;
- Considerar as questões relacionadas ao *status* da geração fotovoltaica, como as condições climáticas e a forma que ocorre sua conexão ao alimentador, a fim de estabelecer melhor a metodologia proposta;
- Desenvolver um sistema automático de determinação de outras funções de proteção, a partir do sistema proposto, como proteção de distância e proteção diferencial;
- Testar a aplicabilidade do método proposto em reconfiguração de sistemas de distribuição, visando à rápida restauração do serviço e à minimização dos impactos da geração distribuída nos indicadores de qualidade;
- Considerar uma maior variação dos pontos de aplicação dos curtos-circuitos, aplicando inclusive entre as barras, em porções variadas, a fim de avaliar o quanto essas variações interferem na atuação da proteção.
- Desenvolver a arquitetura completa de um sistema de proteção adaptativa, isto é, contemplando todas as camadas.
- Avaliar o envio de ajustes pelo sistema SCADA, amplamente utilizado por concessionárias de energia no Brasil, considerando a integração com os sistemas supervisórios das empresas e propondo soluções para possíveis falhas na aquisição de dados.

REFERÊNCIAS

- ABDELAZIZ, A. Y. *et al.* An adaptive protection scheme for optimal coordination of overcurrent relays. *Electric Power System Research*, v. 61, p. 1–9, 2001.
- ABIDIN, A. A. B. Z. *et al.* Determination of overcurrent time delay using fuzzy logic relays. In: *2009 Innovative Technologies in Intelligent Systems and Industrial Applications*. [S.l.: s.n.], 2009. p. 480–485.
- ABYANE, H.; FAEZ, K.; KAREGAR, H. A new method for overcurrent relay (o/c) using neural network and fuzzy logic. In: *TENCON '97 Brisbane - Australia. Proceedings of IEEE TENCON '97. IEEE Region 10 Annual Conference. Speech and Image Technologies for Computing and Telecommunications (Cat. No.97CH36162)*. [S.l.: s.n.], 1997. v. 1, p. 407–410 vol.1.
- AKAGI, H.; WATANABE, E. H.; AREDES, M. *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2017.
- ALAM, M. N.; DAS, B.; PANT, V. A recloser–fuse coordination for radial distribution systems in the presence of multiple distributed generations. *IET Generation, Transmission & Distribution*, p. 2585–2594, 2018.
- ALMEIDA, M. *Apostila de proteção de sistemas elétricos*. Natal: UFRN: IEEE Press Series on Power Engineering, 2000.
- ALVES, E. *et al.* Testing of centralized protection, control and advanced automation for mv networks with der. *CIGRE Paris Session*, 2024.
- ANGGRIAWAN, D. O. *et al.* Digital overcurrent relay implementation with non-standard inverse curve modelling using adaptive neuro fuzzy inference system. In: *2019 International Conference of Artificial Intelligence and Information Technology (ICAIIIT)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 327–330.
- ANSARI, A.; BAKAR, A. A. A comparative study of three artificial intelligence techniques: Genetic algorithm, neural network, and fuzzy logic, on scheduling problem. In: *2014 4th International Conference on Artificial Intelligence with Applications in Engineering and Technology*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 31–36.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA. *Geração Distribuída: conceitos e caminhos para o desenvolvimento sustentável*. São Paulo, 2020.
- BARRADAS h. M. *Proteção adaptativa em redes de distribuição modernas: proposta de um novo método de estimação das correntes de curto-circuito baseado em lógica fuzzy e equações analíticas genéricas*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Ilha Solteira, 2022.
- BHISE, D. R.; KANKALE, R. S.; JADHAO, S. Impact of distributed generation on protection of power system. In: *2017 International Conference on Innovative Mechanisms for Industry Applications (ICIMIA)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 399–405.

- BOLLEN, M. H.; HASSAN, F. Integration of distributed generation in the power system. *John wiley & sons*, v. 80, 2011.
- BORBELY, A. M.; KREIDER, J. F. *Distributed Generation: The Power Paradigm for the New Millennium*. 1. ed. [S.l.]: CRC Press, 2001.
- BRAGA, M. F. *Impacto da geração distribuída na proteção do sistema de distribuição*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Itajubá, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Itajubá, 2017.
- BRAHMA, S.; GIRGIS, A. A. Development of adaptive protection scheme for distribution systems with high penetration of distributed generation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, p. 56–63, 2004.
- BRAHMA, S. M.; GIRGIS, A. A. Microprocessor-based reclosing to coordinate fuse and recloser in a system with high penetration of distributed generation. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, p. 453–458, 2002.
- _____. Development of adaptive protection scheme for distribution systems with high penetration for distributed generation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, p. 55–63, 2004.
- BRASIL. *DECRETO NO. 5.163 DE 30 DE JULHO DE 2004: Regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica e dá outras providências*. Brasília, 2004.
- BRITO, M. A. G. *et al.* Comparative analysis of mppt techniques for pv applications. *2011 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP)*, 2011.
- BRITTO, T. D. *et al.* Distributed generation impacts on the coordination of protection systems in distribution networks. *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, p. 623–628, 2004.
- CARNEIRO, C. A.; CEBRIAN, J. C. Análise comparativa da aplicação das metodologias de proteção salva fusível e queima fusível no desempenho das redes elétricas de distribuição. *Congresso Brasileiro de Automática (CBA)*, 2020.
- CHAITUSANEY, S.; YOKOYAMA, A. Prevention of reability degradation from recloser - fuse miscoordination due to distributed generation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 23, p. 2545–2554, 2008.
- CHANDNA, V. *et al.* Tuned fuzzy controller based over current protection scheme. In: *2008 Joint International Conference on Power System Technology and IEEE Power India Conference*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–4.
- CHEUNG, H. *et al.* Investigations of impacts of distributed generations on feeder protections. *Power & Energy Society General Meeting*, 2009.
- CHOOBINEH, M.; STOUPIS, J. An adaptive overcurrent protection technique for microgrids. *2024 IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI)*, v. 10, p. 1–6, 2024.
- COFFELE, F. *Adaptive protection solutions for future active power distribution networks*. Dissertação (Doutorado em Engenharia Elétrica) — University of Strathclyde, Glasgow, 2012.

CONDE, A.; SHIH, M. Y. An adaptive overcurrent coordination scheme withstanding active network operations. *IEEE Access*, v. 10, p. 104270–104284, 2022.

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

CPFL ENERGIA. *Proteção de redes aéreas de distribuição - Sobrecorrente*. Campinas, 2016.

DODIYA, P. K.; BHALJA, B. R.; SWECHA, T. P. Universal approach to tackle the threat of miscoordination between fuse and recloser in distribution network with distributed generations. *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, 2015.

ELETROBRÁS. *Proteção de Sistemas Aéreos de Distribuição*. Vol. 2. Rio de Janeiro: Ed. Campus, 1982.

ELETROBRÁS. *Dicionário da energia elétrica*. 2020. Disponível em: <<https://eletrobras.com/pt/Paginas/Dicionario-da-Energia-Eletrica.aspx>>.

ENERGISA. *Norma de distribuição unificada - NDU 17*. João Pessoa, 2017.

FERNÁNDEZ, J. S. C. *et al.* Assessment of distributed and centralized protection: Comparison of response times for protective dynamic system on process bus. *CIGRE Paris Session*, 2024.

FERREIRA, G. D.; BRETAS, A. S.; CARDOSO, G. Optimal distribution protection design considering momentary and sustained reliability indices. In: *2010 Modern Electric Power Systems*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–8.

FILHO, J. M.; MAMEDE, D. R. *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*. [S.l.]: GEN/LTC, 2011.

FRACALOSSO, G. V.; VARGAS, M. C.; BATISTA, O. E. Trip solidário em alimentadores de distribuição com geração distribuída. *XXIII Congresso Brasileiro de Automática*, 2020.

FRAZÃO, R. J. A. *Proteção do sistema elétrico de potência*. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2019.

FURLAN, R. H. *et al.* Optimal allocation of distributed generation in a radial distribution network for losses reduction and voltage profile improvement. In: *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6.

GIRGIS, A. A.; BRAHMA, S. M. Effect of distributed generation on protective device coordination in distribution system. *Large Engineering System Conference on Power Engineering*, v. 19, p. 115–119, 2001.

GUARDA, F. G. K. *Metodologia híbrida para alocação, coordenação, dimensionamento e adequação do sistema de proteção em sistemas de distribuição de energia elétrica com geração distribuída diretamente acoplada*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

GUIGUER, S. *Proteção de sistemas aéreas de distribuição*. Porto Alegre: Sagra, 1988.

GÖNEN, T. *Electric power distribution system engineering*. 2nd ed.. ed. Boca Raton: CRC Press LCC, 2008.

HAMAM, A.; GEORGANAS, N. D. A comparison of mamdani and sugeno fuzzy inference systems for evaluating the quality of experience of haptic-audio-visual applications. *2008 IEEE International Workshop on Haptic Audio visual Environments and Games*, p. 87–92, 2008.

HOSSEINZADEH, H. Distribution system protection. *University of Western Ontario*, p. 16, 2008.

HUSSAIN, B. *et al.* An adaptative relaying scheme for fuse saving in distribution networks with distribution generation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 28, 2013.

IEEE. *IEEE Guide for Protective Relay Applications to Distribution Lines*. IEEE Std. C37.230, 2007.

JANÉ, D. A. Uma introdução ao estudo da lógica fuzzy. *Hórus-Revista*, 2004.

KERSTING, W. H. Radial distribution test feeders. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 6, p. 975–985, 1991.

KHEDERZADEH, M.; JAVADI, H.; MOUSAVI, S. M. A. Source type impact of distributed generation (dg) on the distribution protection. *IET International Conference on Developments in Power System Protection*, 2010.

KINDERMANN, G. *Proteção de sistemas elétricos de potência*. 2. ed. Florianópolis, Brasil: LabPlan, 2005.

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

_____. A fast and scalable protection scheme for distribution networks with distributed generation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 31, 2016.

_____. Adaptive directional overcurrent relaying scheme for meshed distribution networks. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2018.

LANGAZANE, S. N.; SAHA, A. K. A comparative review of current optimization algorithms for maximizing overcurrent relay selectivity and speed. *IEEE Access*, v. 12, p. 53205–53223, 2024.

LEITE, R. M.; OLESKOVICZ, M.; COURRY, D. V. A análise de curto-circuito em um sistema ilhado na presença de geração fotovoltaica. *XXIII Congresso Brasileiro de Automática*, 2020.

LIMA, R. C. D. *et al.* Analysis of distributed generation's impact on the protection system of power distribution systems. *Congresso Brasileiro de Automática - CBA*, 2024.

LOPES, F. V. *et al.* Methodology for protection performance evaluation on power transmission networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017.

LU, Y. *et al.* A study on effect of dispersed generator capacity on power system protection. *Power Engineering Society General Meeting*, p. 1–6, 2007.

LUIZ, C. M. *Avaliação dos Impactos da Geração Distribuída para Proteção do Sistema Elétrico*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belo Horizonte, 2012.

MACÊDO, A. V. A. *Controle do ângulo de passo de uma turbina eólica utilizando lógica fuzzy*. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Campina Grande, 2012.

MANUAL, I. Sel-3111-1,-7 relay. 2003.

MARROUCHI, S.; SABER, S. B. A comparative study of fuzzy logic, genetic algorithm, and gradient-genetic algorithm optimization methods for solving the unit commitment problem. *Mathematical Problems in Engineering*, v. 2014, 2014.

MATHWORKS. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/average-model-of-a-100-kw-grid-connected-pv-array.html>>. Acesso em: 30 de junho de 2021. [S.l.: s.n.], 2021.

_____. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/fuzzy/index.html>>. Acesso em: 26 de julho de 2024. [S.l.: s.n.], 2024.

_____. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/sps/powersys/ref/threephasebreaker.html>>. Acesso em: 26 de julho de 2024. [S.l.: s.n.], 2024.

MELO, L. S. *Análise comparativa de modelos de fontes fotovoltaicas no contexto da geração distribuída*. 128 f. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Campina Grande, 2018.

MENDES, M. A. *et al.* Load currents behavior in distribution feeders dominated by photovoltaic distributed generation. *ELECTRIC POWER SYSTEMS RESEARCH*, v. 201, 2021.

MOMESSO, A. E. C.; BERNARDES, W. M. S.; ASADA, E. N. Fuzzy adaptive setting for time-current-voltage based overcurrent relays in distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 108, p. 135–144, 2019.

MONARO, R. M. *et al.* A novel method based on fuzzy logic and data mining for synchronous generator digital protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 30, 2015.

NAIEM, A. F. *et al.* A classification technique for recloser-fuse coordination in distribution systems with distributed generation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 27, p. 176–185, 2012.

NASCIMENTO, J. P. *Um algoritmo de proteção adaptativa para sistemas de distribuição com inserção de geração distribuída*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Campina Grande, 2014.

- NASCIMENTO, J. P. *Um Sistema de Proteção de Sobrecorrente Adaptativa Aplicado a Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. 97 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Campina Grande, 2020.
- NASCIMENTO, J. P.; BRITO, N. S. D.; SOUZA, B. A. Proposition of an adaptive protection scheme for distribution systems with distributed generation. *IEEE Latin America Transactions*, v. 16), p. 1439–1444, 2018.
- OLIVEIRA, N. L. S. *Algoritmo Genético de Coordenação Ótima da Proteção de Sobrecorrente em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Campina Grande, 2010.
- ONS. *Submódulo 2.6: Requisitos Mínimos dos Sistemas de Proteção e de Telecomunicações*. Brasília, 2008.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Sobre o SIN*. Brasília, 2024.
- ORTEGA, N. R. S. *Aplicação da teoria de conjuntos fuzzy a problemas de biomedicina*. Tese — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.
- PEREIRA, R. L. A. *et al.* Reclosers modeling for temporal simulation of distribution networks in simulink/matlab. *IEEE Latin American Transactions*, v. 22, 2024.
- PHADKE, A.; HOROWITZ, S. Adaptive relaying. *IEEE Computer Applications in Power*, v. 3, p. 47–51, 1990.
- PHOLBORISUT, N.; SAKSORNCHAIL, T.; EUA-ARPORN, B. Evaluating the impact of distributed generation on protection system coordination using protection miscoordination index. *The 8th International Conference on Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, p. 865–868, 2011.
- PINTO, J. T. M.; AMARAL, K. J.; JANISSEK, P. R. Deployment of photovoltaics in brazil: Scenarios, perspectives and policies for low-income housing. *Solar Energy*, v. 133, p. 73–84, 2016.
- PUJANTARA, M.; ABDILLAH, M. Intelligent over current relays based on interval type 2 fuzzy logic approach. In: *2012 International Conference on Green and Ubiquitous Technology*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 58–61.
- REBIZANT, W.; BEJMERT, D.; SZAFRAN, J. Fuzzy logic based overcurrent protection for mv networks. *15th PSCC*, 2005.
- REIS, M.; STOLLFUSS, M.; TALWAR, S. Transition from device management to application management for protection & control through virtualization and centralization. *CIGRE Paris Session*, 2024.
- RODRIGUES, B. G. *Otimização da Proteção em Redes de Distribuição com Geração Distribuída*. 238 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Itajubá, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Itajubá, 2021.
- SHERBILLA, N. F. *et al.* Modified setting of overcurrent protection for distribution feeders with distributed generation. *IET Conference on Renewable Power Generation (RPG)*, 2011.

- SHIH, M. Y. *et al.* Mitigating the impact of distributed generation and fault current limiter on directional overcurrent relay coordination by adaptive protection scheme. *2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, p. 1–6, 2019.
- SHORT, T. *Electric power distribution handbook*. United States: CRC PRESS, 2004.
- SILVA, K. Q. *et al.* An adaptive protection system for distribution network with distributed generation. In: *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6.
- SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. *Controle e Modelagem Fuzzy*. 2a ed.. ed. São Paulo: Blucher, 2007.
- SOUZA, B. A. *Distribuição de energia elétrica – Apostila*. [S.l.]: DEE/UFPB, 1997.
- SOUZA JR., F. C. *Algoritmo auto-adaptativo para proteção de sobrecorrente instantânea*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Campina Grande, 2016.
- STANDARD, I. Single input energising quantity measuring relays with dependent specified time. Publication no. 255-4, 1976.
- STARCK, J. *et al.* functional testing of virtualised and centralised protection systems. *CIGRE Paris Session*, 2024.
- VARGAS, M. C.; MENDES, M. A.; BATISTA, O. E. Impacts of high pv penetration on voltage profile of distribution feeders under brazilian electricity regulation. In: *2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 38–44.
- VASCONCELOS, L. H. P. *et al.* Hybrid optimization algorithm applied to adaptive protection in distribution systems with distributed generation. *Electric Power Systems Research*, 2022.
- VIAWAN, F. A. *et al.* Protection scheme for meshed distribution systems with high penetration of distributed generation. *Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources*, v. 24, 2006.
- WALT, H. L. R.; BANSAL, R. C.; NAIDOO, R. Pv based distributed generation powersystem protection: A review. *Renewable Energy Focus*, v. 24, 2018.
- XUE, Y. *et al.* Topologies of single-phase inverters for small distributed power generators: An overview. *IEEE Transactions Power Electron*, v. 19, p. 1305–1314, 2004.
- YOUSAF, M. *et al.* An adaptive overcurrent protection scheme for dual-setting directional recloser and fuse coordination in unbalanced distribution networks with distributed generation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, p. 1831–1842, 2022.
- YOUSAF, M.; MUTTAQI, K.; SUTANTO, D. An investigative analysis of the protection performance of unbalanced distribution networks with higher concentration of distributed energy resources. *IEEE Transactions on Industry Applications*, p. 1771–1782, 2022.

APÊNDICE A

Toolbox DA LÓGICA *Fuzzy* NO MATLAB®

O *software* MATLAB® contém um sistema interativo, linguagem de programação própria, bibliotecas para cálculos aritméticos básicos e um grande número de ferramentas especializadas para a resolução de problemas em áreas específicas, denominados de *toolboxes*.

Nesta Tese foi utilizado o *fuzzy Logic Toolbox*, o qual contém uma *interface* gráfica denominada *Graphical User Interface* (GUI) que permite a construção de sistemas *fuzzy*. Esse *toolbox* possui quatro ferramentas GUI para projeto que são conectados dinamicamente, isto é, alterações feitas em um processo afetam todas as demais:

- *Fuzzy Inference System* ou editor FIS.
- Editor de funções de pertinência.
- Editor de regras.
- Visualizados de regras.

Apresentam-se a seguir várias telas do *fuzzy Logic Toolbox*, indicando passo a passo como proceder para construir o sistema *fuzzy*.

Para iniciar o FIS basta digitar *fuzzyLogicDesigner* no terminal do programa, conforme apresentado na Figura 59. Quando o *toolbox* é iniciado já contém uma variável de entrada e uma de saída, conforme apresentado na Figura 60. O usuário pode adicionar a quantidade de variáveis necessárias e nomeá-las, conforme detalhado na Figura 61.

Figura 59 – Janela do MATLAB®.

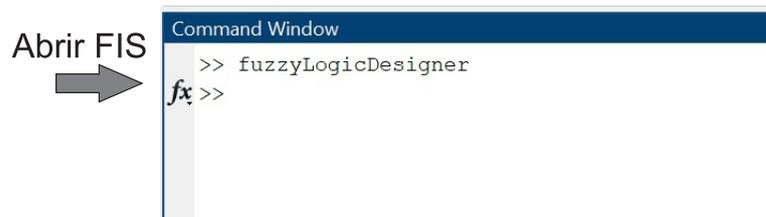


Figura 60 – Tela inicial de edição do FIS.

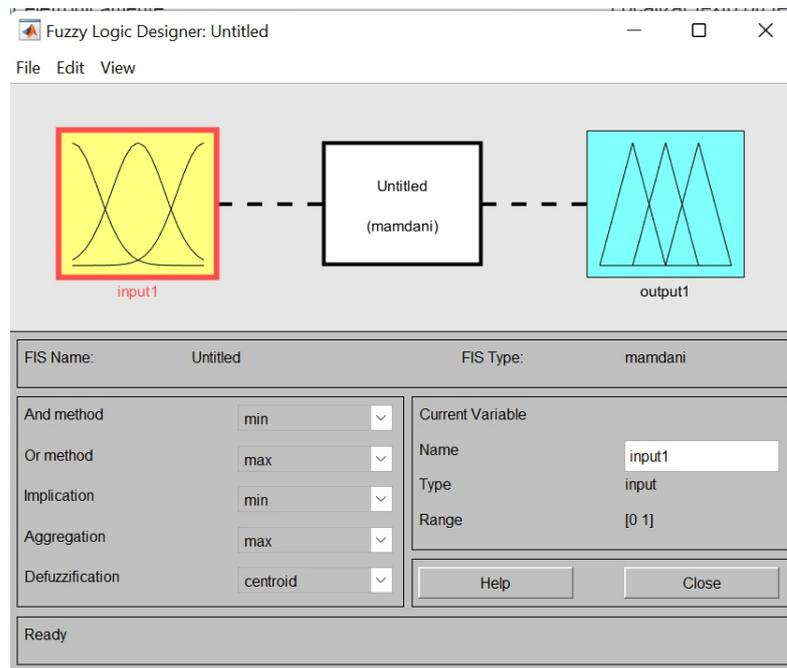
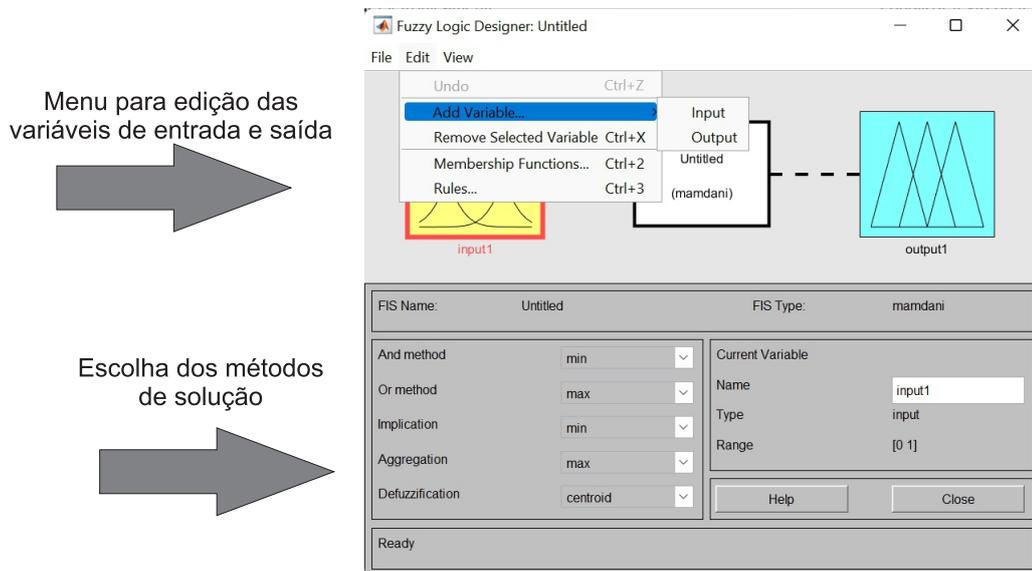
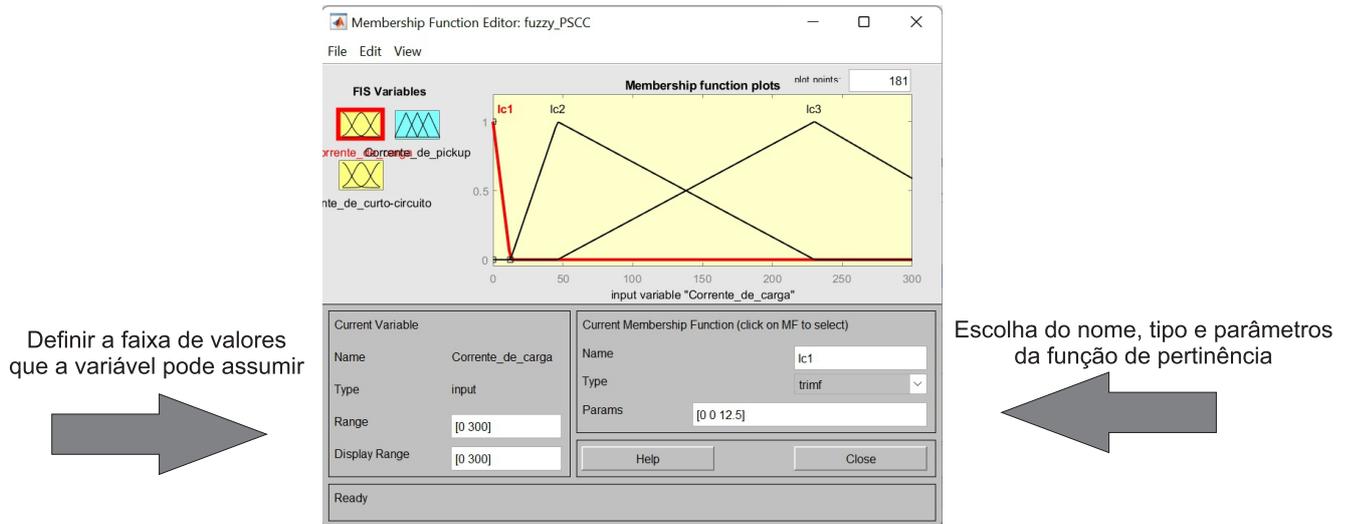


Figura 61 – Menu de edição das variáveis de entrada e saída.



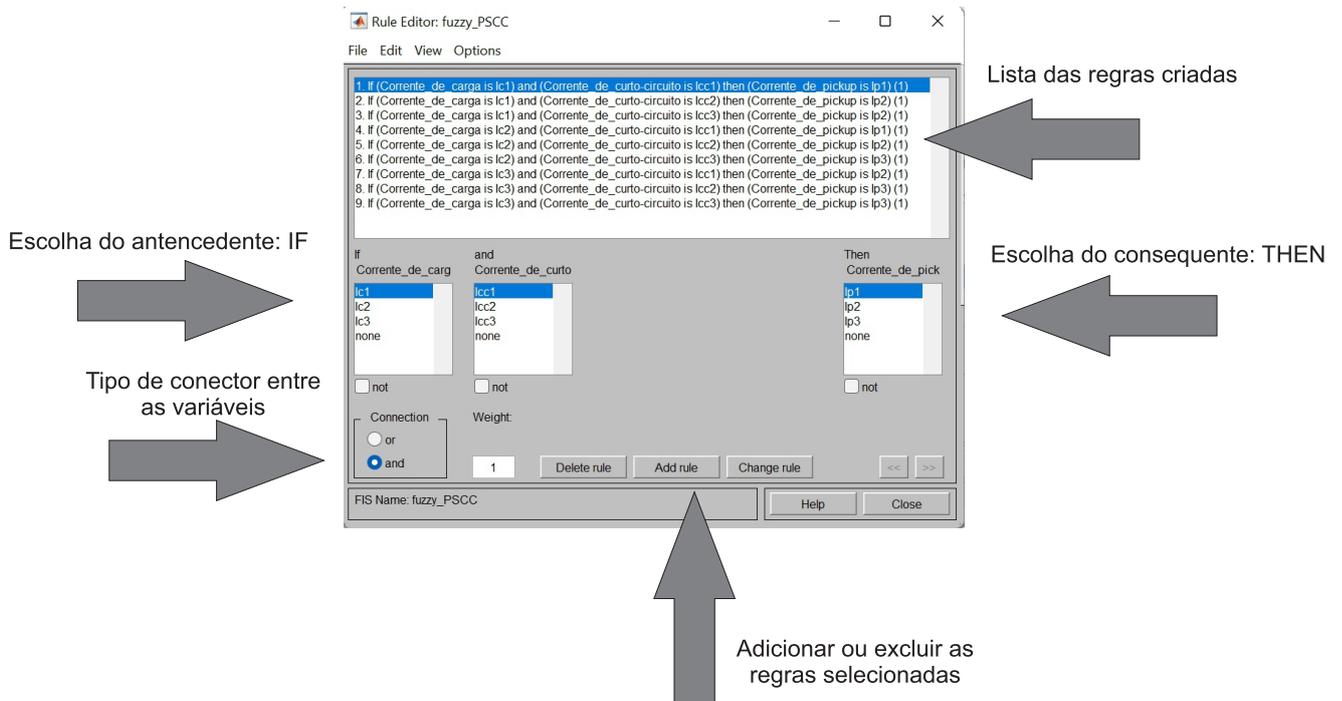
Para editar as funções de pertinência, basta dar um duplo clique na variável desejada. Ao acessar essa janela, o usuário pode definir a taxa de valores que a variável pode assumir, definir o tipo da função de pertinência e os parâmetros da mesma. A Figura 62 apresenta esta etapa.

Figura 62 – Edição das funções de pertinência.



O próximo passo consiste em definir as regras do sistema *fuzzy*, de acordo com o mapa de regras que foi apresentado na Tabela 3. O editor de regras está apresentado na Figura 63. Nesta etapa, o usuário escolhe os antecedentes e consequentes da regra “Se-Então”, bem como seu conector. À medida que as regras são adicionadas, vão sendo listadas no editor para permitir que o usuário confira se elas estão corretas, podendo ser excluídas ou editadas, caso necessário.

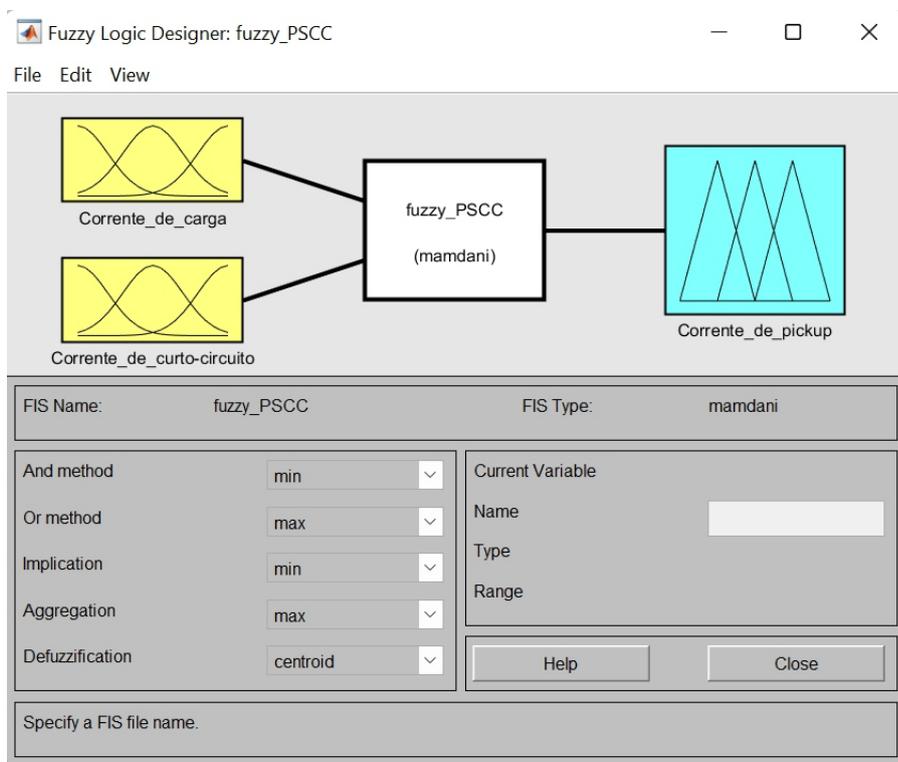
Figura 63 – Editor da base de regras.



Ao fim destas etapas, constrói-se o sistema *fuzzy* desejado, apresentado na Figura 64, o qual será responsável por calcular a corrente de *pickup* da proteção de

sobrecorrente.

Figura 64 – Sistema *fuzzy* construído.

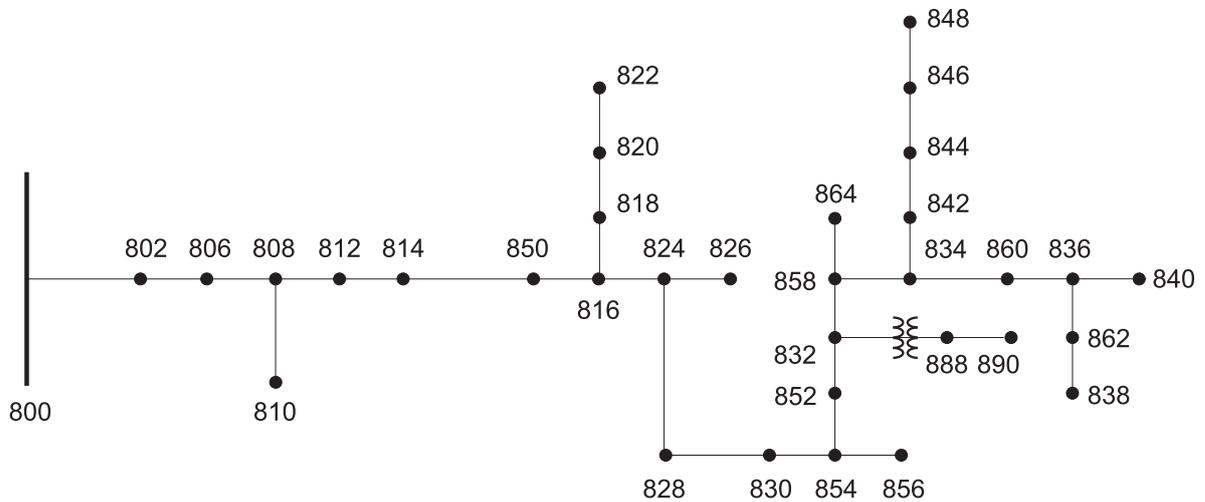


ANEXO A

SISTEMA-TESTE IEEE 34 BARRAS

A seguir, apresentam-se o diagrama unifilar e dados do sistema-teste IEEE 34 barras¹ considerado para simulação dos resultados desta Tese. Esse sistema consiste de um alimentador real primário de 24,9 kV, sendo caracterizado por ser muito longo e levemente carregado.

Figura 65 – Sistema-teste IEEE 34 barras.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 10 – Cargas pontuais do sistema-teste IEEE 34 barras.

Barra	Carga	Potência ativa (kW)			Potência reativa (kVAR)		
		Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
860	Y-PQ	20	20	20	16	16	16
840	Y-I	9	9	9	7	7	7
844	Y-Z	135	135	135	105	105	105
848	D-PQ	20	20	20	16	16	16
890	D-I	150	150	150	75	75	75
830	D-Z	10	10	25	5	5	10

¹ Modelo disponível em:
www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/73169-ieee-34-node?s_tid=srchtitle

Tabela 11 – Cargas distribuídas do sistema-Teste IEEE 34 barras.

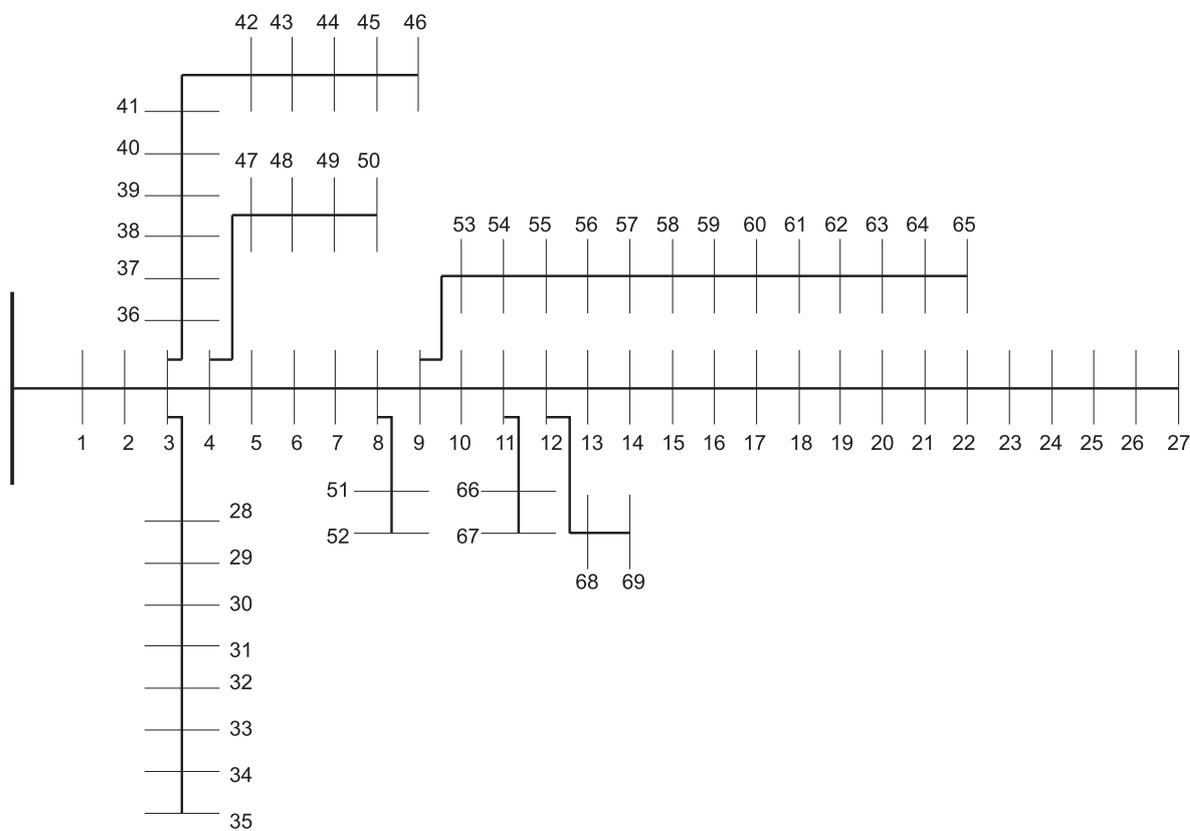
Trecho	Carga	Potência ativa (kW)			Potência reativa (kVAR)		
		Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
802-806	Y-PQ	0	30	25	0	15	14
808-810	Y-I	0	16	0	0	8	0
818-820	Y-Z	34	0	0	17	0	0
820-822	Y-PQ	135	0	0	70	0	0
816-824	D-I	0	5	0	0	2	0
824-826	Y-I	0	40	0	0	20	0
824-828	Y-PQ	0	0	4	0	0	2
828-830	Y-PQ	7	0	0	3	0	0
854-856	Y-PQ	0	4	0	0	2	0
832-858	D-Z	7	2	6	3	1	3
858-864	Y-PQ	2	0	0	1	0	0
858-834	D-PQ	4	15	13	2	8	7
834-860	D-Z	16	20	110	8	10	55
860-836	D-PQ	30	10	42	15	6	22
836-840	D-I	18	22	0	9	11	0
862-838	Y-PQ	0	28	0	0	14	0
842-844	Y-PQ	9	0	0	5	0	0
844-846	Y-PQ	0	25	20	0	12	11
846-848	Y-PQ	0	33	0	0	11	0

ANEXO B

SISTEMA-TESTE IEEE 69 BARRAS

Apresenta-se a seguir o sistema-teste modelado e as informações das cargas distribuídas do sistema-teste IEEE 69 barras¹. Esse sistema opera na tensão nominal de 12,66 kV e potência nominal de 10 MVA.

Figura 66 – Sistema-teste IEEE 69 barras.



Fonte: Autoria própria.

¹ Modelo disponível em:
www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/88111-ieee-69-bus-system?s_tid=srchtitle

Tabela 12 – Cargas distribuídas do sistema-teste IEEE 69 barras.

Trecho	Potência ativa (kW)	Potência reativa (kVAR)	Trecho	Potência ativa (kW)	Potência reativa (kVAR)
1-2	0	0	4-36	0	0
2-3	0	0	36-37	79	56,4
3-4	0	0	37-38	384,7	274,5
4-5	0	0	38-39	384,7	274,5
5-6	2,6	2,2	8-40	40,5	28,3
6-7	40,4	30	40-41	3,6	2,7
7-8	75	54	9-42	4,35	3,5
8-9	30	22	42-43	26,4	19
9-10	28	19	43-44	24	17,2
10-11	145	104	44-45	0	0
11-12	145	104	45-46	0	0
12-13	8	5,5	46-47	0	0
13-14	8	5,5	47-48	100	72
14-15	0	0	48-49	0	0
15-16	45,5	30	49-50	1244	888
16-17	60	35	50-51	32	23
17-18	60	35	51-52	0	0
18-19	0	0	52-53	227	162
19-20	1	0,6	53-54	59	42
20-21	114	81	11-55	18	13
21-22	5,3	3,5	55-56	18	13
22-23	0	0	12-57	28	20
23-24	28	20	57-58	28	20
24-25	0	0	3-59	26	18,55
25-26	14	10	59-60	26	18,55
26-27	14	10	60-61	0	0
3-28	26	18,6	61-62	24	17
28-29	26	18,6	62-63	24	17
29-30	0	0	63-64	1,2	1
30-31	0	0	64-65	0	0
31-32	0	0	65-66	6	4,3
32-33	14	10	66-67	0	0
33-34	19,5	14	67-68	39,22	26,3
34-35	6	4	68-69	39,22	26,3