

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

Antônio Eduardo Ceolin Momesso

**Uma proposta de proteção adaptativa com religadores em
sistemas de distribuição de energia elétrica**

São Carlos

2022

Antônio Eduardo Ceolin Momesso

Uma proposta de proteção adaptativa com religadores em sistemas de distribuição de energia elétrica

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

Área de concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Nobuhiro Asada

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

São Carlos

2022

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

M732 Momesso, Antonio Eduardo Ceolin
Uma proposta de proteção adaptativa com religadores em sistemas de distribuição de energia elétrica / Antônio Eduardo Ceolin Momesso; orientador Eduardo Nobuhiro Asada. São Carlos, 2022.
119 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas Elétricos de Potência – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2022.

1. Religador. 2. Proteção autoadaptativa. 3. Fusível. 4. Ordenação. 5. Sistema de distribuição. I. Asada, Eduardo Nobuhiro, orient. II. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

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

Título da tese: "Uma proposta de proteção adaptativa com religadores em sistemas de distribuição de energia elétrica".

Data da defesa: 05/09/2022.

Comissão Julgadora

Resultado

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

APROVADO

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

APROVADO

Prof. Dr. **Benemar Alencar de Souza**
(Universidade Federal de Campina Grande/UFCG)

APROVADO

Prof. Dr. **Silvio Giuseppe Di Santo**
(Escola Politécnica/EP-USP)

APROVADO

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

APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica:
Prof. Dr. **João Bosco Augusto London Junior**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

AGRADECIMENTOS

A Deus, por minha vida, saúde, família e amigos.

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

A minha esposa Nathalia Momesso, por estar sempre ao meu lado, me ajudando nos momentos difíceis e por entender os momentos de ausências.

Ao meu filho Heitor Momesso, pelas alegrias e momentos de distrações.

Ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Asada pela orientação, dedicação e apoio na elaboração deste trabalho, bem como pelos conselhos e conversas que tivemos.

Aos meus amigos e colegas de laboratório (Laboratório de Análise de Sistemas de Energia Elétrica - LASEE) e do Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica (LSEE), pelos conhecimentos, conversas, momentos compartilhados e apoio dado.

Aos meus companheiros e amigos de P&D, Pedro Barbalho e Pedro Barra.

Aos professores, colegas e amigos do Instituto Federal de Mato Grosso - Campus Pontes e Lacerda – Fronteira Oeste, em especial ao Andrei Coimbra, Élder Hipólito e Ermete Bianchi.

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

Por fim, um agradecimento especial a Alzira Perlin, simplesmente por tudo. Descanse em paz!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de Financiamento 001 e em partes pelo Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica, da ANEEL: P&D número 2866-0454/2016 – Sistema de Armazenamento Transportável para Suporte a Contingências Programadas em Subestações – parceria entre EESC-USP, CPqD e Copel S.A..

“Há um tempo em que é preciso abandonar as roupas usadas, que já tem a forma do nosso corpo, e esquecer os nossos caminhos, que nos levam sempre aos mesmos lugares. É o tempo da travessia: e, se não ousarmos fazê-la, teremos ficado, para sempre, à margem de nós mesmos.”

Fernando Teixeira de Andrade

RESUMO

Momesso, A. E. C. **Uma proposta de proteção adaptativa com religadores em sistemas de distribuição de energia elétrica.** 2022. 119f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

A pesquisa e aplicação de novas tecnologias de comunicação e computação permitem modernizar o sistema elétrico, beneficiando a qualidade e continuidade dos serviços prestados. Somado a isso, há a necessidade de tornar os sistemas elétricos mais seguros e confiáveis, por meio do desenvolvimento de novos métodos de proteção que considerem novas funcionalidades. Essa modernização possibilita que os equipamentos de proteção se adequem às mudanças que ocorrem no sistema elétrico, podendo ser através de ajustes automáticos, ou seja, sem a intervenção humana, o que proporciona menor risco de falhas e maior segurança. No entanto, tais avanços devem conciliar com os equipamentos analógicos já presentes nos sistemas de proteção, como os fusíveis. Nesse sentido, este trabalho propõe o estudo de um religador autoadaptativo para a proteção dos sistemas de distribuição, considerando a presença de fusíveis. Para isso, propõe-se um ajuste automático do múltiplo de tempo, visando a coordenação com os diferentes equipamentos de proteção a jusante, e um ajuste automático da corrente de *pick-up*, para uma melhor sensibilidade do equipamento. O *software* utilizado para a implementação e simulação computacional foi o *Power Systems Computer Aided Design – Electro Magnetic Transient Design and Control* (PSCADTM-EMTDCTM). O sistema de ajuste autoadaptativo proposto foi aplicado em religadores para proteção de fase e neutro. Além disso, foram modeladas as chaves fusíveis, que são equipamentos analógicos amplamente utilizados em sistemas de distribuição. Uma vez estruturados os modelos e rotinas necessários, foram realizados estudos nos sistemas de teste de distribuição de 34 e 134 barras, a fim de avaliar e demonstrar o desempenho do equipamento em questão. A flexibilidade proporcionada pelos ajustes propostos, que permitem a incorporação de novas lógicas e mudanças na tomada de decisão, resultou em um método autoadaptativo com bom desempenho frente a diferentes localizações, tipos e impedâncias de faltas. Também resultou em melhor coordenação entre os dispositivos de proteção. Os resultados comparados com a proteção convencional mostraram um ganho de desempenho significativo com o sistema autoadaptativo.

Palavras-chave: Religador. Proteção autoadaptativa. Fusível. Coordenação. Sistema de distribuição.

ABSTRACT

Momesso, A. E. C. **A proposal for adaptive protection with reclosers in electric power distribution systems.** 2022. 119f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

Research and application of new communication and computing technologies allow the modernization of the electric system, which benefits the quality and continuity of the services provided. Added to this, there is a need to make electrical systems safer and more dependable, through the development of new protection methods that consider new functionalities. This modernization enables the protective equipment to adapt to the changes that occur in the electrical system and can be done through automatic adjustments, i.e., without human intervention, which provides less risk of failure and increased security. However, such advances must reconcile with the analog equipment already present in the protection systems, such as fuses. In this sense, this work proposes the study of a self-adaptive recloser for the protection of distribution systems, considering the presence of fuses. For that, an automatic adjustment of the time multiple, aiming at the coordination with the different downstream protection equipment, and an automatic adjustment of the pick-up current, for better sensitivity of the equipment, are proposed. The software used for the implementation and computational simulation was the Power Systems Computer Aided Design – Electro Magnetic Transient Design and Control (PSCADTM-EMTDCTM). The proposed self-adaptive adjustment system was applied in reclosers for phase and earth protection. Furthermore, the fuse switches, which are analog equipment widely used in distribution systems, were modeled. Once the necessary models and routines were structured, studies were performed in the 34-bus and 134-bus distribution test systems, to evaluate and demonstrate the performance of the equipment in question. The flexibility provided by the proposed adjustments, which allow the incorporation of new logics and changes in decision making, resulted in a self-adaptive method with a satisfactory performance against different fault locations, types, and impedances. It also resulted in better coordination between protective devices. The results compared with conventional protection showed a significant performance gain with the self-adaptive system.

Keywords: Recloser. Self-adaptive protection. Fuse. Coordination. Distribution systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo de operação do religador.	30
Figura 2 – Exemplos de instalação do seccionador.	33
Figura 3 – Coordenação entre religador-religador.	35
Figura 4 – Sistema para explicação do ajuste automático do múltiplo de tempo do religador.	40
Figura 5 – Sistema para explicação do cálculo da corrente de fata no fusível.	43
Figura 6 – Coordenação entre religador e fusíveis. $I_p^r = 40,0$ A.	45
Figura 7 – Fluxograma do ajuste autoadaptativo do múltiplo de tempo do religador.	46
Figura 8 – Estrutura de funcionamento do religador convencional.	49
Figura 9 – Estrutura de funcionamento do religador adaptativo.	50
Figura 10 – Estrutura de funcionamento do fusível.	52
Figura 11 – Sistema teste de distribuição de 34 barras para o Caso 1.	54
Figura 12 – Boxplots dos tempos de atuação retardada do religador para o Caso 1, considerando a proteção adaptativa.	60
Figura 13 – Boxplots dos tempos de atuação retardada do religador para o Caso 1, considerando a proteção convencional.	61
Figura 14 – Sistema teste de distribuição de 34 barras para o Caso 2.	64
Figura 15 – Boxplots dos tempos de atuação retardada dos religadores R_1 e R_2 para o Caso 2, considerando a proteção adaptativa.	69
Figura 16 – Boxplots dos tempos de atuação retardada dos religadores R_1 e R_2 para o Caso 2, considerando a proteção convencional.	70
Figura 17 – Sistema teste de distribuição de 134 barras para o Caso 3.	74
Figura 18 – Boxplots dos tempos de atuação rápida do religador para o Caso 1.	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Correntes nos equipamentos de proteção (Caso 1)	55
Tabela 2 – Mínimas e máximas correntes de curto-circuito medidas pelo fusível e pelo religador (em ampere)	56
Tabela 3 – Avaliação estatística dos tempos de atuação retardada do religador para o Caso 1, considerando a proteção adaptativa	56
Tabela 4 – Avaliação estatística dos tempos de atuação retardada do religador para o Caso 1, considerando a proteção convencional	58
Tabela 5 – ITC, em segundos, entre a curva retardada do religador e o tempo máximo de ruptura do fusível (Caso 1)	61
Tabela 6 – Avaliação estatística do múltiplo de tempo, obtido pelo ajuste adaptativo, para faltas envolvendo religador e fusível (Caso 1)	62
Tabela 7 – Dados dos religadores alocados no Caso 2	63
Tabela 8 – Correntes nos equipamentos de proteção (Caso 2)	65
Tabela 9 – Diferença, em módulo, entre a corrente de curto-circuito mediada pelo fusível e a corrente estimada pelo religador	65
Tabela 10 – Avaliação estatística dos tempos de atuação retardada dos religadores R_1 e R_2 para o Caso 2, considerando a proteção adaptativa	67
Tabela 11 – Avaliação estatística dos tempos de atuação retardada dos religadores R_1 e R_2 para o Caso 2, considerando a proteção convencional	68
Tabela 12 – ITC, em segundos, entre a curva retardada do religador e o tempo máximo de ruptura do fusível (Caso 2)	70
Tabela 13 – Avaliação estatística do múltiplo de tempo, obtido pelo ajuste adaptativo, para faltas envolvendo religador e fusível (Caso 2)	71
Tabela 14 – ITC, em segundos, entre a curva retardada do religador adaptativo e o tempo máximo de ruptura do fusível, considerando erro nos dados de carga (Caso 2)	72
Tabela 15 – Correntes nos equipamentos de proteção sem GD (Caso 3)	75
Tabela 16 – Correntes nos equipamentos de proteção com GD (Caso 3)	75
Tabela 17 – Mínimas e máximas correntes de curto-circuito medidas pelos fusíveis e pelos religadores sem GD (em ampere)	76
Tabela 18 – Mínimas e máximas correntes de curto-circuito medidas pelos fusíveis e pelos religadores com GD (em ampere)	76
Tabela 19 – Avaliação estatística dos tempos de atuação retardada dos religadores R_1 , R_2 , R_3 e R_4 para o Caso 3, considerando a proteção adaptativa	77
Tabela 20 – Avaliação estatística dos tempos de atuação retardada dos religadores R_1 , R_2 , R_3 e R_4 para o Caso 3, considerando a proteção convencional	79

Tabela 21 – ITC médio, em segundos, entre a curva retardada do religador e o tempo máximo de ruptura do fusível, considerando a proteção adaptativa (Caso 3)	81
Tabela 22 – ITC médio, em segundos, entre a curva retardada do religador e o tempo máximo de ruptura do fusível, considerando a proteção convencional (Caso 3)	83
Tabela 23 – Avaliação estatística do múltiplo de tempo, obtido pelo ajuste adaptativo, para faltas envolvendo religador e fusível (Caso 3)	85
Tabela 24 – Avaliação estatística dos tempos de atuação retardada dos religadores R_1 , R_2 , R_3 e R_4 para o Caso 3, considerando a proteção adaptativa e as GDs	86
Tabela 25 – ITC médio, em segundos, entre a curva retardada do religador e o tempo máximo de ruptura do fusível, considerando a proteção adaptativa e as GDs (Caso 3)	88
Tabela 26 – Avaliação estatística do múltiplo de tempo, obtido pelo ajuste adaptativo e com as GDs, para faltas envolvendo religador e fusível (Caso 3)	90
Tabela 27 – Avaliação estatística dos tempos de atuação rápida do religador para o Caso 1	101
Tabela 28 – Tempo de operação, em segundos, do fusível envolvido na falta (Caso 1)	103
Tabela 29 – ITC, em segundos, entre tempo mínimo de ruptura do fusível e a curva rápida do religador (Caso 1)	104
Tabela 30 – Tempo de operação, em segundos, do fusível envolvido na falta (Caso 2)	105
Tabela 31 – ITC, em segundos, entre tempo mínimo de ruptura do fusível e a curva rápida do religador (Caso 2)	106
Tabela 32 – ITC, em segundos, entre os tempos de ruptura dos fusíveis em série (Caso 2)	106
Tabela 33 – Tempo de operação médio, em segundos, do fusível envolvido na falta (Caso 3) sem GD	107
Tabela 34 – ITC médio, em segundos, entre o tempo mínimo de ruptura do fusível e a curva rápida do religador, sem GD (Caso 3)	110
Tabela 35 – Tempo de operação médio, em segundos, do fusível envolvido na falta (Caso 3) com GD	112
Tabela 36 – ITC médio, em segundos, entre o tempo mínimo de ruptura do fusível e a curva rápida do religador, com GD (Caso 3)	115

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
F	Fusível
GD	Geração Distribuída
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
ITC	Intervalo de Tempo de Coordenação
LaPSEE	Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica
MRT	Monofilar com Retorno por Terra
P	Ponto de falta
R	Religador
S	Seccionador
SD	Sistema de Distribuição
SIAP	Sistema Inteligente para Mudança Automática de Ajuste do Sistema de Proteção
SRA	Sistema de Reposição Automática
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
UNESP	Universidade Estadual Paulista

LISTA DE SÍMBOLOS

I_{max}^c	Máxima corrente de carga
I_{10min}^f	Mínima corrente de curto-circuito fase-terra enxergada pelo fusível
I_n^f	Corrente nominal do elo fusível
I_f^r	Corrente de falta medida pelo religador
I_p^r	Corrente de <i>pick-up</i> do religador
MT	Múltiplo de tempo
t_{min}^{fb}	Tempo mínimo de atuação do elo fusível protegido
t_{max}^{fp}	Tempo máximo de atuação do elo fusível protetor
t_{ac}	Tempo de abertura dos contatos do religador
t_{at}	Tempo de atuação do relé de sobrecorrente
t_{cl}	Tempo da operação de fechamento do religador
t_{fc}	Tempo de fechamento dos contatos do religador
t_{op}	Tempo da operação de abertura do religador
t_r	Tempo de espera para o religamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Considerações Iniciais	15
1.2	Revisão Bibliográfica	17
1.3	Estrutura do Trabalho	21
2	FUNDAMENTOS DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO	22
2.1	Considerações Iniciais	22
2.2	Termos Empregados no Sistema de Proteção	22
2.3	Conceitos Gerais do Sistema de Proteção	23
2.4	Chave Fusível	25
2.5	Religadores	28
2.6	Seccionadores Automáticos	31
2.7	Coordenação entre os Dispositivos de Proteção	33
2.7.1	Seletividade fusível-fusível	33
2.7.2	Coordenação religador-fusível	34
2.7.3	Coordenação religador-religador	35
2.8	Considerações Finais	36
3	METODOLOGIA E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL	38
3.1	Considerações Iniciais	38
3.2	<i>Software</i> PSCAD™/EMTDC™	38
3.3	Ajuste Adaptativo do Religador	39
3.3.1	Ajuste automático do múltiplo de tempo do religador	40
3.3.2	Ajuste automático da corrente de <i>pick-up</i>	47
3.4	Implementação Computacional dos Equipamentos de Proteção no <i>Software</i> PSCAD™/EMTDC™	49
3.5	Implementação do Religador	49
3.6	Implementação do Fusível	51
3.7	Considerações Finais	52
4	ESTUDO DE CASOS	53
4.1	Considerações Iniciais	53
4.2	Especificações e Simulações	53
4.2.1	Caso 1	53
4.2.2	Caso 2	63

4.2.3	Caso 3	73
4.3	Considerações Finais	91
5	CONCLUSÃO	92
	REFERÊNCIAS	95
	APÊNDICES	100
	APÊNDICE A – CASO 1	101
	APÊNDICE B – CASO 2	105
	APÊNDICE C – CASO 3	107
	APÊNDICE D – TRABALHOS CIENTÍFICOS	117

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

O fornecimento de energia elétrica é de grande importância devido à nossa crescente demanda e dependência por esta mercadoria. Assim, um sistema diversificado, no qual a energia é gerada, transmitida e distribuída, deve ser desenvolvido de modo a garantir o fornecimento aos diversos setores da sociedade. Visando assegurar a qualidade dos serviços de energia elétrica prestados pelas concessionárias, há o monitoramento de inúmeros parâmetros por parte das agências reguladoras, dentre os quais, ressaltam-se os indicadores de continuidade de atendimento, que estão relacionados com o número de interrupções que podem ocorrer no sistema elétrico. Desta forma, são empregados esquemas de proteção no sistema elétrico objetivando extrair o máximo dos equipamentos, sem perda de segurança, ou seja, permitir a entrega de mais potência sem perda de estabilidade e degradação dos equipamentos. Além disso, também possuem como função a manutenção da integridade do sistema elétrico mediante o aparecimento de falhas, o que garante, além da segurança das pessoas, a continuidade do atendimento aos usuários não envolvidos no problema. Portanto, os sistemas de proteção devem possuir uma boa sensibilidade e confiabilidade, a fim de proteger uma zona de proteção maior, bem como boa seletividade e coordenação, a fim de obter um menor tempo de resposta aos curtos-circuitos e uma área afetada menor.

Dentre os diversos equipamentos destinados à proteção, os religadores e os fusíveis são os mais empregados nos Sistemas de Distribuição (SDs). Eles são responsáveis por manter a segurança, a confiabilidade e a qualidade do sistema elétrico, perante os curtos-circuitos causados, por exemplo, por descargas atmosféricas, deterioração da isolação, vandalismo ou contato de animais ou galhos de árvores. Como a maioria das falhas (podendo ser cerca de 85%) no SD são de natureza transitória e fase-terra (ELEKTRO, 2014), elas podem ser eliminadas sem perda de suprimento ou com uma interrupção rápida, diferentemente dos curtos-circuitos permanentes, que resultam em longas interrupções.

Em geral, os equipamentos de proteção são ajustados com base em estudos de curtos-circuitos em regime permanente, visando obter a coordenação e a seletividade entre os dispositivos que compõem o sistema de proteção. Os fusíveis, devido à sua simplicidade e custo-benefício, são amplamente utilizados na proteção de SDs. Contudo, tendo em conta a sua natureza construtiva, a coordenação destes, com os demais equipamentos, pode tornar-se muito trabalhosa ou não ideal. Assim, como não é possível realizar alterações na sua construção de forma viável, resta-nos aprimorar os demais equipamentos de proteção.

Com o advento da *internet* das coisas (do inglês: *Internet of Things*, IoT), cujo objetivo é fazer com que os objetos consigam interagir uns com os outros e cooperar entre si

(ATZORI; IERA; MORABITO, 2010), e da tecnologia de comunicação 5G, que permitirá uma alta taxa de dados com baixa latência (menor que 1 ms) (ANDREWS *et al.*, 2014), é possível que os ajustes dos equipamentos de proteção se tornem autoadaptativos, com base nas medições e comunicações realizadas por eles (SOUZA JÚNIOR, 2016; TANG; YANG, 2017; ZHANG *et al.*, 2013).

Para dar suporte a esse cenário de dispositivos inteligentes, em 2010 a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) realizou a chamada de P&D Estratégico N° 011/2010 intitulada Programa Brasileiro de Rede Elétrica Inteligente (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2010). Dentre os projetos, destaca-se o P&D 0391-0011/2011 denominado “InovCity”, cujo objetivo foi implementar uma rede inteligente que contemplasse mobilidade elétrica, Geração Distribuída (GD), eficiência energética, medição inteligente, iluminação pública eficiente e automação de rede, no Estado de São Paulo (REDES INTELIGENTES BRASIL, 201-b). Além dele, destaca-se também o projeto de P&D 0039-0016/2010 intitulado “Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento para implantação de um Piloto de Redes Inteligentes (*Smart Grid*) para Automação do Sistema Elétrico - Aquiraz” no estado do Ceará, o qual teve como objetivo implantar um Sistema de Reposição Automática (SRA) e um Sistema Inteligente para Mudança Automática de Ajuste do Sistema de Proteção (SIAP) em uma rede de média tensão (13,8 kV) (REDES INTELIGENTES BRASIL, 201-a).

Nesse contexto, é exposto o presente trabalho, cujo objetivo principal é apresentar, implementar e analisar o desempenho de um sistema de ajuste autoadaptativo do múltiplo de tempo e da corrente de *pick-up*, aplicado em religadores. A motivação desta pesquisa se deve ao fato de que a alocação de fusíveis, na maioria das vezes, é distante dos religadores, o que pode levar a longos tempos de operação quando o religador é o dispositivo de proteção primário. Somado a isso, sabemos que a modernização do SD, com o uso de GDs e reconfigurações da rede, pode causar dificuldades de coordenação e seletividade, ou mesmo na perda de eficácia entre os dispositivos de proteção. Assim, como veremos, os ajustes autoadaptativos do religador auxiliam na manutenção do sistema de proteção. Além disso, este trabalho também considerou a presença de fusíveis, bem como a existência de uma infraestrutura de comunicação que atendesse a metodologia proposta. Os estudos foram realizados no *software* PSCADTM/EMTDCTM, que permite simulações no domínio do tempo.

Como será visto ao longo dos capítulos, o sistema em estudo tem como característica um processamento local, porém, necessita de comunicação com os demais dispositivos inteligentes, tendo em vista que um ajuste realizado por determinado equipamento implica no tempo de atuação do outro. Este modo de operação permite que os dispositivos inteligentes tenham uma seletividade automática, considerando os demais equipamentos que possuem ajuste fixo (fusíveis), sem intervenção humana. Desta forma, espera-se que

as mudanças que ocorrem no sistema elétrico com o passar do tempo (por exemplo: alterações de carga e topologia; localização, tipo e quantidade de geração; etc.), não afetem a coordenação e seletividade entre os equipamentos. Ademais, o religador em questão apresenta, como diferencial dos religadores convencionais, um ajuste mais sensível aos equipamentos a jusante, bem como uma coordenação mais fácil quando mais de um dispositivo é instalado no SD.

1.2 Revisão Bibliográfica

Religadores juntamente com fusíveis têm sido empregados para lidar com faltas temporárias e permanentes no SD. No entanto, esses dispositivos de proteção são normalmente alocados a uma grande distância um do outro. Como consequência, os curtos-circuitos permanentes perduram no sistema elétrico por longos tempos, quando o religador é o dispositivo de proteção primário, dada a necessidade de coordenar o religador com todos os fusíveis a jusante.

Para tentar melhorar os tempos de operação dos dispositivos de proteção, são propostos trabalhos visando determinar uma coordenação ótima entre esses equipamentos. Como exemplo, podemos citar o artigo de Alam, Das e Pant (2018), em que se utiliza o método de pontos interiores para realizar uma otimização da coordenação entre religadores e fusíveis, de modo a obter um ajuste fixo para esses dispositivos, considerando as diversas condições de operação e localização das GDs na rede de distribuição. Já o trabalho de Faria *et al.* (2020) propõe alocar, dimensionar e coordenar dispositivos de proteção em um SD com e sem GDs, considerando os custos dos equipamentos, o índice de duração média de interrupção do sistema e os custos esperados com energia não atendida.

Os trabalhos apresentados até o momento, assim como grande parte dos estudos de coordenação encontrados na literatura, consideram apenas dispositivos de proteção clássicos. Como consequência, reduções significativas no tempo de operação do religador acabam não sendo obtidas, tendo em vista que este dispositivo ainda necessita ser coordenado com todos os equipamentos de proteção a jusante, para uma determinada faixa de corrente de curto-circuito.

Uma forma de lidar com essas limitações é empregar equipamentos com ajustes inteligentes. No entanto, como pode ser observado na revisão feita por Singh (2017), a maioria dos trabalhos relacionados à proteção do SD desconsideram o uso de religadores e fusíveis, e somente consideram a presença de relés de sobrecorrente. Dentre as diversas técnicas para a coordenação ou autoajuste de relés, destacam-se os métodos baseados em sistemas inteligentes, como redes artificiais (REZAEI; HAGHIFAM, 2008; ZAYANDEH-ROODI *et al.*, 2011), sistemas *fuzzy* (KUMAR *et al.*, 2015; MOMESSO; BERNARDES; ASADA, 2019) e multiagentes (CHEN; LEE; CHANG, 2013; ZHU; SONG; WANG, 2009).

Considerando os estudos que utilizam religadores e fusíveis, vale ressaltar também que são poucos os que exploram todo o potencial dos ajustes inteligentes. Usualmente o trabalho é limitado a casos específicos, ou seja, a mudanças topológicas ou a entrada e saída de geradores ou linhas. Como exemplo, podemos citar o artigo de Shah e Bhalja (2014) que ajusta o múltiplo de tempo do religador baseado na relação entre a corrente do fusível e a corrente do religador. De maneira geral, se a corrente do fusível for maior que a corrente que passa no religador, e isso pode ser possível quando há GDs, o múltiplo de tempo é modificado, de forma que haja coordenação entre os equipamentos. Contudo, este artigo não considera as mudanças topológicas ou de cargas, as quais podem influenciar nas correntes que circulam pelo equipamento e, conseqüentemente, não tornar a corrente do fusível maior que a do religador.

Outro trabalho que pode ser citado é o de Makwana, Bhalja e Gokaraju (2020), que altera a curva de atuação rápida do religador de acordo com um fator de modificação, definido com base na relação entre o valor pré-ajustado da impedância de sequência positiva e o valor calculado pelo religador. Quando o valor da impedância calculada for maior que o pré-ajustado e o estado do disjuntor da GD estiver fechado, a curva de atuação rápida do religador é alterada. Como pode ser visto, a perda de coordenação causada por uma mudança topológica é resolvida. Contudo, não se busca nenhuma melhoria no tempo de operação dos dispositivos de proteção, em específico dos religadores.

Dentre os estudos que utilizam religadores e fusíveis, podemos dividi-los em três grupos. No primeiro são considerados ajustes fixos que contemplam a maioria das mudanças topológicas críticas do sistema elétrico. É o caso do trabalho de Ferraz *et al.* (2020), que aplica uma otimização baseada em um algoritmo genético para obter a coordenação ótima dos dispositivos de proteção, considerando, simultaneamente, os modos de operação das GDs, os tipos de faltas e a variação diária da carga. Em Gutierrez, Cardoso e Marchesan (2014), é investigada uma metodologia para a coordenação entre religador e fusível em sistemas com GD. No estudo, é definida uma margem crítica de coordenação e é feita uma monitoração da rede. No momento em que ocorre uma falta no SD, os geradores responsáveis pela violação da coordenação são desconectados, o que reduz a corrente e, conseqüentemente, mantém a coordenação.

Também neste grupo podem ser incluídos os trabalhos que limitam a capacidade das GDs inseridas no SD, como é o caso do artigo de Chaitusaney e Yokoyama (2005), que determina o tamanho da GD a ser inserida, sem perda de coordenação entre os equipamentos existentes, por meio da análise do fluxo de potência ótimo. Ademais, é considerada na função custo a redução das perdas e a duração da interrupção, tendo em vista que a GD será inserida como *backup* da fonte principal. Naiem *et al.* (2012), por outro lado, apresenta uma técnica de classificação para determinar o estado da coordenação entre religador-fusível durante a inserção da GD. Caso não haja coordenação, duas ações são

recomendadas: a primeira é buscar uma melhor localização para a GD, a fim de diminuir o número de descoordenação; a segunda baseia-se na alteração da configuração do religador, visando minimizar as perdas de coordenação.

Os estudos que utilizam limitadores de corrente podem se enquadrar nesse grupo, visto que não há mudanças nos ajustes da proteção. Como exemplo, podemos citar o artigo de Kim *et al.* (2010), que analisa a coordenação entre religador-fusível quando são utilizados supercondutores, considerando que o uso de limitadores pode diminuir a corrente que passa pelo fusível, o que, conseqüentemente, não o faz fundir antes do bloqueio do religador. Assim, eles propõem um método baseado no cálculo da impedância do sistema e na faixa de impedância do supercondutor, para determinar a corrente nominal dos fusíveis para este caso. Além disso, o trabalho de Chabanloo *et al.* (2018) apresenta o uso de um algoritmo de otimização multiobjetivo, para determinar o tamanho mínimo de um limitador de corrente e a configuração ideal do sistema de proteção, sendo a configuração ideal definida através de uma implementação híbrida, baseada no algoritmo genético e na programação linear. Este método é utilizado em uma nova coordenação dos equipamentos de proteção em SDs com GDs modeladas como máquinas síncronas.

O segundo grupo consiste em métodos de ajustes adaptativos que modificam os parâmetros dos dispositivos de proteção de acordo com configurações pré-programadas, ou seja, os ajustes são realizados de acordo com o conhecimento prévio das possíveis situações de contingência. Neste grupo se enquadra o trabalho de Fani, Dadkhah e Karami-Horestani (2018) em que se modificam os ajustes da proteção com base no perfil de tensão do sistema elétrico com a presença de sistemas fotovoltaicos. Uma técnica *offline* foi utilizada para calcular o grupo de ajuste mais apropriado para cada perfil de tensão. Assim, dependendo do valor da tensão medida, um algoritmo *online* aplica o grupo de ajuste predefinido ao dispositivo de proteção correspondente. Em Nikolaidis, Papanikolaou e Safigianni (2016), são propostos dois grupos de ajuste dos relés para situações em que uma grande diferença na corrente de falta é encontrada, considerando a operação ilhada e conectada à rede elétrica. Assim, foi necessário definir dois diferentes ajustes da curva de operação tempo *vs.* corrente para cada elemento de fase e neutro, considerando os dois cenários de operação.

O trabalho de Dawoud, Ibrahim e Gilany (2017) também se enquadra nesse segundo grupo. Nele são propostas duas soluções para o ajuste adaptativo do religador. A primeira, *offline*, pode ser aplicada quando não houver mudanças frequentes no SD. Neste método, o religador possui duas categorias de ajuste, uma para presença de GD e outra para sua ausência. A segunda, *online*, é adotada quando as GDs são frequentemente conectadas ao sistema. Neste caso, uma unidade de controle é responsável por receber as informações da rede e de realizar a comunicação com o religador. Com a inserção da GD, a máxima corrente de falta vista pelo religador e pelo fusível é determinada por meio da análise de curto-circuito. Com esses valores, o múltiplo de tempo do religador é definido. Apesar da

corrente de carga ser considerada neste trabalho, o ajuste do religador baseado no pior caso pode levar a um aumento significativo no tempo de atuação, além de tornar sua aplicação indesejada.

Por fim, o terceiro grupo, no qual esta pesquisa se encontra, consiste no ajuste dos parâmetros dos dispositivos de proteção de forma automática, ou seja, um ajuste autoadaptativo. Neste grupo, os ajustes não são pré-programados, mas calculados em tempo real pelos dispositivos de proteção. Dessa forma, o sistema de proteção permanece operacional mesmo com mudanças no sistema elétrico além do escopo planejado, tais como entradas e saídas significativas de blocos de carga e redes com presença massiva de GDs. É o caso do trabalho de Perez *et al.* (1995), que apresenta um religador com ajuste automático, em que, por meio dos estados das chaves do SD, obtidos pelo sistema de Controle Supervisório e Aquisição de Dados (do inglês: *Supervisory Control and Data Acquisition*, SCADA), pode-se determinar os ajustes dos dispositivos de proteção. Segundo os autores, tais ajustes podem contemplar a corrente de *pick-up*, o múltiplo de tempo, o número de operações instantâneas e de religamento e o tempo de religamento.

Khalifa *et al.* (2018) utilizam agentes distribuídos em redes inteligentes para ajustar o múltiplo de tempo do religador. Os agentes distribuídos estão localizados nos pontos dos fusíveis, de modo que seja possível transmitir os valores das correntes vistas por esses equipamentos durante uma situação de falta. Quando a corrente do fusível excede um valor predeterminado, a coordenação entre o fusível e o religador é verificada de forma *online*. Para isso, a corrente medida pelos agentes é transmitida ao religador, de modo que seja calculado o tempo de ruptura neste equipamento e, assim, ajustado o múltiplo de tempo.

Outro estudo que se enquadra nesse grupo é o de Jamali e Borhani-Bahabadi (2017), que expõe uma nova curva de operação do religador de modo a salvar o fusível em sistemas com e sem GDs. Para tanto, a nova característica não padrão utiliza, além da medição da corrente, a tensão para calcular o tempo de atuação.

Há também trabalhos que não se enquadram nos grupos apresentados, como é o caso do artigo de Kamel *et al.* (2013), que demonstra o impacto que a inserção da GD provoca no sistema de proteção, além de propor uma nova coordenação baseada no uso de religadores direcionais e no reajuste desses equipamentos, juntamente com a alteração da corrente nominal dos fusíveis. O trabalho de Yousaf e Mahmood (2017) também utiliza religadores direcionais simultaneamente com fusíveis, em sistemas com GD. Neste caso, para cada nova geração conectada ao sistema, é realizado um estudo de coordenação, e verifica-se se há necessidade de alteração do ajuste do equipamento. Esses trabalhos apresentados não recorrem a um ajuste fixo (primeiro grupo) e, também, não utilizam ajuste adaptativo (segundo grupo), pois os grupos de ajuste não são previamente definidos.

Diante do que foi apresentado, esta tese propõe a obtenção de um menor tempo de

atuação do religador, principalmente quando este é o dispositivo de proteção primário, dada a não necessidade de coordenação com todos os dispositivos de proteção a jusante. Como os ajustes do religador são realizados *online*, com base nas medições de corrente e localização da falta, é possível ajustar a corrente de *pick-up* e o múltiplo de tempo para obter tempos de operação baixos. Mesmo os casos de curto-circuito permanente envolvendo um fusível podem se beneficiar dos ajustes propostos, uma vez que uma falha de operação do fusível pode ser rapidamente sanada devido à melhor coordenação entre os dispositivos envolvidos na falta. Além disso, alterações que possam ocorrer no SD são automaticamente consideradas na operação do religador devido ao ajuste autoadaptativo proposto.

1.3 Estrutura do Trabalho

Para atingir os objetivos propostos, além deste capítulo introdutório, esta tese de doutorado está estruturada conforme os seguintes capítulos:

- O Capítulo 2 situa o leitor a respeito dos conceitos gerais do sistema de proteção e dos principais equipamentos encontrados. Posteriormente, é realizada uma descrição detalhada da utilização, construção, características técnicas, dimensionamento e coordenação dos principais dispositivos de proteção utilizados no SD.
- O Capítulo 3 tem como objetivo principal explicar a metodologia empregada para o ajuste adaptativo do religador. Para tanto, é necessário realizar uma breve explicação sobre a alocação e o ajuste dos dispositivos de proteção, bem como as etapas necessárias para que seja possível a alteração do múltiplo de tempo e da corrente de *pick-up* de forma automática.
- O Capítulo 4 tem como principal propósito apresentar um estudo do desempenho operacional do religador com ajuste automático do múltiplo de tempo e da corrente de *pick-up*. Para realizar a análise de desempenho, tal equipamento é aplicado em sistemas testes, com a finalidade de apresentar uma comparação com os dispositivos convencionais.
- O Capítulo 5 tem por objetivo apresentar uma conclusão geral do trabalho como um todo, bem como as principais constatações alcançadas em cada capítulo anterior, de modo que se permita sintetizar o que foi apresentado. Além disso, serão ressaltados os objetivos alcançados, bem como os trabalhos futuros sobre o tema.
- Nos Apêndices serão mostrados, resumidamente, os resultados que não são o foco deste trabalho, mas que foram obtidos durante as simulações. Também serão apresentados os trabalhos científicos elaborados no decorrer deste doutorado.

2 FUNDAMENTOS DO SISTEMA DE PROTEÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO

2.1 Considerações Iniciais

O objetivo de um sistema elétrico é fornecer energia elétrica com qualidade e confiabilidade. A ocorrência de curtos-circuitos frequentes ou prolongados, além de prejudicar a rotina da sociedade, pode causar problemas de segurança ou danos aos equipamentos, tornando imprescindível o uso de dispositivos de proteção, visto que eles conseguem isolar os curtos-circuitos de forma rápida e eficiente. Essa capacidade permite aumentar a confiabilidade e a segurança do fornecimento de energia, além de possibilitar a minimização dos custos de reparação dos estragos, da probabilidade de o defeito se propagar e envolver outros equipamentos, do tempo do equipamento ficar inativo, entre outros. Contudo, deve-se levar em consideração os aspectos econômicos que podem, na maioria das vezes, limitar a quantidade ou a categoria do dispositivo de proteção.

Neste capítulo, será dado início aos estudos dos equipamentos de proteção utilizados no SD, foco deste trabalho. Todavia, antes de entrar nesse contexto especificamente, será realizada uma breve apresentação dos conceitos utilizados no sistema de proteção. Posteriormente, serão apresentados os fundamentos, construção, características técnicas e dimensionamento das chaves fusíveis, religadores e seccionadores automáticos. Por fim, será explicado a respeito da coordenação entre fusível-fusível, religador-fusível e religador-religador.

2.2 Termos Empregados no Sistema de Proteção

Antes de dar início ao conteúdo técnico desta tese, buscou-se reunir os principais termos empregados neste trabalho, no que se refere ao sistema de proteção, de modo a esclarecer e equalizar algumas definições.

- *Pick-up*: ou também conhecido como acionamento, refere-se ao limiar no qual o dispositivo de proteção irá operar, ou seja, é a partir deste valor que o equipamento irá entrar em operação.
- *Trip*: trata-se do sinal enviado por um equipamento de proteção para a abertura do circuito elétrico.
- Zona de proteção: refere-se à área de um sistema elétrico na qual o dispositivo de proteção tem como responsabilidade proteger. Ela é obtida ao se determinar o dispositivo de proteção responsável por salvaguardar determinado equipamento/elemento. De modo geral, todos os equipamentos/elementos devem estar ao menos em uma

zona de proteção e as zonas podem se sobrepor de modo a não criar nenhum ponto cego (PHADKE; THORP, 2009).

- Dispositivo primário: ou também conhecido como dispositivo principal ou protetor, refere-se ao equipamento de proteção que está mais próximo da falta, condicionado ao fato do curto-circuito se localizar na sua zona de proteção.
- Dispositivo secundário: ou também conhecido como dispositivo de retaguarda, *backup* ou dispositivo protegido, trata-se do equipamento de proteção responsável por atuar devido à manutenção ou falha do dispositivo primário.
- Intervalo de tempo de coordenação: refere-se à diferença de tempo obtida entre a operação do dispositivo primário e a possível operação do dispositivo secundário. Também pode ser considerado como o tempo de espera para a atuação do dispositivo secundário no caso de falha do dispositivo principal.
- Confiabilidade: trata-se da capacidade do dispositivo de proteção de operar somente nas condições para as quais foi concebido (COURY; OLESKOVICZ; GIOVANINI, 2011).
- Sensibilidade: refere-se à habilidade de resposta do equipamento de proteção frente aos curtos-circuitos e anormalidades que ocorrem no sistema elétrico (CAMINHA, 1977).
- Seletividade: trata-se da capacidade do dispositivo de proteção em atuar somente para a zona de proteção a qual foi instalado. Para tanto, o equipamento deve conseguir reconhecer e selecionar entre uma operação rápida, retardada ou não operação (CAMINHA, 1977).
- Velocidade de atuação: refere-se ao tempo de resposta do dispositivo de proteção. Um bom sistema de proteção apresenta tempos de permanência de falta reduzidos, assegurando a operação normal das partes não envolvidas no curto-circuito e auxiliando na manutenção da estabilidade do sistema elétrico.

2.3 Conceitos Gerais do Sistema de Proteção

Como o sistema elétrico não é isento de falhas, sejam elas causadas por fatores internos (sobrecarga, defeito em equipamento, desgaste, etc.) ou externos (vandalismo, tempestades, acidentes, etc.), se faz necessário o emprego de equipamentos de proteção. Tais dispositivos procuram reduzir os danos que podem ocorrer, tanto nos equipamentos das concessionárias, quanto dos consumidores, garantindo, assim, a qualidade do serviço e o prolongamento da vida útil das instalações. Portanto, segundo Hewitson, Brown e Balakrishnan (2005), as principais funções dos equipamentos de proteção são: (*i*) proteger

o sistema, de forma a manter a continuidade do fornecimento; (ii) minimizar os danos e diminuir os custos relativos a uma falta; e (iii) garantir a segurança das pessoas.

Segundo Coury, Oleskovicz e Giovanini (2011), um bom sistema de proteção deve considerar requisitos como: sensibilidade, velocidade de atuação e confiabilidade. Existem inúmeras formas de melhorar esses requisitos, porém, tais melhorias estão intimamente ligadas ao aumento do custo de implementação. Portanto, o custo do sistema de proteção não pode ser ignorado, sendo ele o limitante do grau de proteção que será implementado em um sistema elétrico.

Independente do equipamento utilizado e seu custo, espera-se que ele consiga isolar a falta o mais rápido possível, ou seja, que seu tempo de processamento (comparação e decisão) e abertura (ação) seja pequeno, mas sem falsas operações. Quanto menor o tempo de isolamento, maior a estabilidade do sistema elétrico e menor o dano causado, pois a energia liberada durante a falta (proporcional ao produto do quadrado da corrente de falta pelo tempo de duração da falha) será menor. Além disso, cada equipamento de proteção deve possuir alguma restrição, de modo que ele só seja sensível às faltas próximas a ele e dentro da sua zona de proteção, visando assim, manter a seletividade.

Diante do que foi apresentado no parágrafo anterior, o sistema de proteção pode ser definido como um arranjo completo de equipamentos de proteção e periféricos necessários para o cumprimento de sua função. Dentre os equipamentos que compõem o sistema de proteção voltados para os SDs, destacam-se:

- Os fusíveis: que são autodestrutivos, ou seja, cujo elemento metálico se funde ao conduzir corrente acima de um determinado valor;
- Os transdutores (Transformador de Corrente (TC) e Transformador de Potencial (TP)): que são responsáveis por fornecerem medidas precisas durante as condições de falta, além de separar eletricamente os equipamentos a eles conectados do restante do sistema elétrico;
- Os relés: que, por meio da lógica de atuação própria, sensibilizam-se e enviam o sinal de *trip* para a abertura do disjuntor. Além disso, geralmente também possuem a função de alarme;
- Os disjuntores: que são dispositivos destinados a abrir o circuito elétrico e, assim, isolar o trecho com falha do restante do sistema elétrico;
- As baterias: que são utilizadas para garantir a ininterrupção da energia para os relés e os disjuntores;
- Os religadores: que possuem a capacidade de repetir as operações de abertura e fechamento de um circuito durante a ocorrência da falta.

Além dos equipamentos de proteção mencionados, no SD também é possível encontrar seccionadores automáticos, cuja função é abrir um trecho do alimentador quando, na presença de um defeito a jusante, houver a interrupção da corrente por um equipamento de retaguarda.

A seguir será dado mais detalhe a respeito das chaves fusíveis, dos religadores e dos seccionadores automáticos, encontrados nos SDs, quanto às suas características funcionais, construtivas e operacionais.

2.4 Chave Fusível

A chave fusível foi introduzida há mais de cem anos e foi uma das primeiras formas de proteger o sistema elétrico. Apesar disso, devido à sua simplicidade e baixo custo, ela ainda é largamente utilizada nos SDs (CHRISTOPOULOS; WRIGHT, 1999).

A chave fusível é um equipamento monopolar, destinada à proteção de sobrecorrente de circuitos primários. Normalmente é utilizada em redes aéreas de distribuição de baixa potência (média tensão), urbanas ou rurais, tendo em vista que seu uso em sistemas de alta tensão é de difícil seletividade e de pouca confiabilidade. Tal equipamento é constituído por um elemento fusível (parte ativa) que se funde e interrompe o circuito na passagem de uma corrente elevada (HEWITSON; BROWN; BALAKRISHNAN, 2005; MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2011).

Também é composta por isoladores de porcelana vitrificada, de um sistema de articulação do cartucho e do cartucho ou porta-fusível (conhecido popularmente como canela). Os isoladores, como o próprio nome sugere, têm a função de isolar a parte energizada do suporte no qual se encontra a chave fusível. Dependendo do local a ser empregada e das características da tensão e corrente nominais, esta pode ser constituída de um ou dois isoladores. Já o sistema de articulação do cartucho é formado: (i) pelo limitador de recuo, cuja função é intertravar o cartucho ao corpo da chave; (ii) pelo limitador de abertura de 180°, que tem o papel de impedir que o cartucho atinja a estrutura adjacente inferior durante a abertura; (iii) pelo batente dos contatos, cuja finalidade é proteger os contatos contra danos por impactos e deformações; e (iv) pelo amortecedor, que tem o objetivo de suavizar o impacto da operação de abertura do porta-fusível. O cartucho é outro elemento principal da chave fusível, sendo constituído de um tubo de fibra de vidro ou fenolite. Dentro desse tubo são gerados os gases destinados à interrupção do arco, e a sua construção depende de como esses gases escapam, podendo ser somente pela parte inferior ou pelas duas extremidades do cartucho. Cabe ressaltar que o dimensionamento do cartucho é realizado em função da sua capacidade de ruptura no ponto a ser instalado. Caso a corrente de curto-circuito seja superior à sua capacidade de ruptura, o cartucho não resistirá às forças resultantes e explodirá (MAMEDE FILHO, 2013).

Quanto à abertura da chave fusível, esta deve ser realizada somente quando o circuito se encontra sem carga, ou, no caso da utilização para a proteção de transformadores, somente quando existe a circulação da corrente de magnetização (mesmo neste caso pode haver a presença de arco-voltaico). Entretanto, existem chaves fusíveis que permitem a abertura do circuito elétrico com carga sem a necessidade de equipamentos especiais. Tais chaves possuem uma câmara de extinção que, no momento da abertura sob carga, desvia a corrente do contato da chave para um contato auxiliar instalado dentro da câmara. O arco elétrico formado gera um gás deionizante que ajuda na sua extinção. Já em condições normais de operação, essas chaves interrompem a corrente de falta por meio da queima do fusível, sem a participação da câmara de extinção, tal qual ocorre nas chaves convencionais (MAMEDE FILHO, 2013).

Devido ao custo mais elevado das chaves fusíveis de abertura em carga, algumas concessionárias preferem utilizar a ferramenta de abertura em carga (*load buster*). Com a utilização desta ferramenta, chaves fusíveis convencionais podem ser abertas com o sistema carregado, tendo em vista que nela existe uma câmara de extinção de arco. Cabe comentar que a utilização dessa ferramenta diminui os custos para a concessionária, pois uma *load buster* pode abrir várias chaves fusíveis convencionais, evitando assim a compra de várias chaves fusíveis de abertura em carga.

Como mencionado anteriormente, o elo fusível é a parte ativa da chave fusível. Ele é um elemento sensível à corrente e se funde quando uma corrente elevada atravessa seus terminais, sendo o tempo de rompimento inversamente proporcional ao valor da corrente. Pode ser fabricado de duas formas: elo fusível de botão, cuja extremidade superior possui um botão metálico e as correntes nominais estão entre 1 e 200 A; e elo fusível de argola ou olhal, cujas extremidades possuem duas argolas e é instalado ao tempo, geralmente para a proteção de transformadores em sistemas Monofilares com Retorno por Terra (MRTs), com corrente nominal de 1 a 50 A (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011; MAMEDE FILHO, 2013).

Os elos fusíveis são caracterizados pelas curvas de atuação tempo *vs.* corrente, as quais permitem classificá-los em três tipos diferentes (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011):

1. Elos fusíveis do tipo H: são utilizados na proteção primária dos transformadores de distribuição e possuem valores de corrente nominal de até 5 A. São considerados elos fusíveis de alto surto, ou seja, apresentam tempo de atuação lento para correntes elevadas. Essa atuação lenta é necessária para evitar a operação durante a passagem da corrente *inrush* do transformador. Geralmente começam a operar a partir de 1,5 vezes a corrente nominal;
2. Elos fusíveis do tipo K: são amplamente empregados na proteção de redes aéreas de

distribuição urbanas ou rurais, sendo considerados fusíveis de atuação rápida. Eles são agrupados em duas classes diferentes (preferencial e intermediário) de modo que a coordenação só é possível entre os elos fusíveis do mesmo grupo (ANDERSON, 1999). Ademais, possuem valores de corrente nominal de até 200 A e geralmente começam a operar a partir de 2,0 vezes a corrente nominal;

3. Elos fusíveis do tipo T: são fusíveis de atuação lenta, normalmente aplicados na proteção de ramais primários de redes aéreas de distribuição. Da mesma forma que os fusíveis do tipo K, eles são separados em dois grupos e possuem os mesmos valores de corrente nominal. Também, começam a operar a partir de 2,0 vezes a corrente nominal.

Em relação às curvas de tempo *vs.* corrente, estas fornecem gráficos úteis na elaboração de projetos de proteção e coordenação. Três categorias diferentes de curvas são geralmente fornecidas (IEEE, 2001; MARDEGAN, 2012):

1. Curva mínima de fusão: corresponde ao menor tempo de fusão para uma determinada corrente, ou seja, o menor tempo necessário para ocorrer a fusão do elemento fusível sem a presença de corrente antes do evento;
2. Curva máxima de fusão: corresponde à curva de mínimo tempo de fusão acrescida de um valor de corrente, admitido pelo fabricante, como margem de tolerância do tempo de fusão;
3. Curva máxima de interrupção: corresponde à curva de tempo máximo de fusão acrescida de um tempo de extinção do arco elétrico.

Segundo Mamede Filho e Mamede (2011), para a proteção do SD, devem ser aplicados os seguintes critérios para o dimensionamento e a utilização dos elos fusíveis:

- Prever o crescimento da carga para um período de no mínimo 5 anos;
- Prever situações de manobra de cargas devido às manutenções da rede;
- Considerar uma corrente nominal igual ou superior a 150% da corrente máxima de carga no trecho a ser protegido (HEWITSON; BROWN; BALAKRISHNAN, 2005), conforme Equação 2.1.

$$I_n^f \geq 1,5 \times I_{max}^c \quad (2.1)$$

onde I_n^f é a corrente nominal do elo fusível e I_{max}^c é a maior corrente de carga do trecho a ser protegido;

- Determinar as correntes de faltas trifásicas, bifásicas, bifásicas para o terra e monofásicas em todos os pontos a serem protegidos;
- Considerar uma corrente nominal igual ou menor a 25% da corrente de falta monofásica, aplicada no final do trecho protegido, para uma resistência de falta de 40Ω (Equação 2.2).

$$I_n^f \leq \frac{I_{1\emptyset min}^f}{4} \quad (2.2)$$

onde $I_{1\emptyset min}^f$ é a mínima corrente de curto-circuito fase-terra enxergada pelo fusível;

- Reduzir ao mínimo o número de elos fusíveis nos alimentadores sem a perda da proteção;
- Reduzir ao mínimo as categorias de elos fusíveis;
- Não utilizar fusíveis do tipo H em ramais primários dos alimentadores.

2.5 Religadores

Os religadores podem ser definidos como equipamentos de proteção que interrompem e restabelecem automaticamente o circuito elétrico, por meio de uma sequência predeterminada de abertura e fechamento, de modo a tentar restaurar a normalidade do circuito sob defeito.

Tais dispositivos são ideais para a eliminação de curtos-circuitos transitórios no SD, sem a necessidade do deslocamento da equipe de manutenção para restabelecer o circuito defeituoso. Assim, estes equipamentos são empregados em larga escala em circuitos aéreos urbanos e rurais, porém não devem ser utilizados em instalações industriais, comerciais ou subterrâneas, tendo em vista que, nestes locais, os defeitos são quase sempre de natureza permanente (MAMEDE FILHO; MAMEDE, 2011).

Segundo Gers e Holmes (2011), os religadores são utilizados: (i) em subestações¹, para promover a proteção primária do circuito; (ii) em alimentadores principais, de modo a permitir o seccionamento de linhas longas e, assim, evitar a perda de um circuito inteiro devido a uma falta no final do ramal; e (iii) em ramais laterais ou circuitos terminais, para proteger a abertura do alimentador principal devido às faltas nestes circuitos.

De modo geral, todos os religadores, ao calcularem uma corrente maior que a corrente de acionamento, enviam um sinal para que seja realizada a abertura dos contatos principais. Após um intervalo de tempo, chamado de tempo de religamento, outro sinal é

¹ Geralmente nas subestações são empregados relés de sobrecorrente junto a relés de religamento. Contudo, como esse conjunto de equipamentos desempenham papel semelhante ao religador, foi convencionado chamá-los, neste trabalho, de religadores.

enviado para que seja realizado o fechamento dos contatos, reenergizando, assim, o circuito seccionado. Se a falta ainda persistir, é dado início ao ciclo de religamento, que realiza a abertura e o fechamento, conforme as condições programadas no controle do religador, até que o curto-circuito seja eliminado pelo bloqueio do religador, pela atuação da proteção a jusante ou naturalmente (GERS; HOLMES, 2011).

Durante a operação, pode ser utilizado um dos seguintes ciclos de atuação, ou parte deles, com no máximo quatro operações (MAMEDE FILHO, 2013):

- Uma operação rápida e três retardadas;
- Duas operações rápidas e duas retardadas;
- Três operações rápidas e uma retardada;
- Quatro operações rápidas.

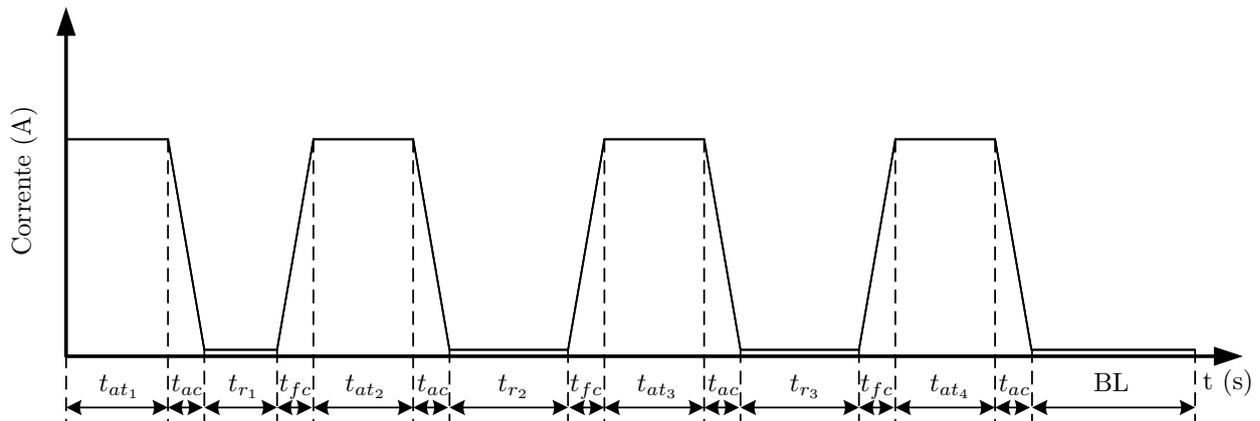
Essa flexibilidade de poder ajustar, desde um *trip* instantâneo ou uma operação rápida, até uma ação retardada, é uma das principais características desses equipamentos. Desta forma, para faltas temporárias, uma ou mais atuações rápidas podem ser suficientes para deionizar o ar, de tal modo que um subsequente religamento permite restaurar o circuito ao normal, sem nenhuma interrupção permanente da carga. Quanto às faltas semipermanentes, estas podem ser eliminadas por meio de uma operação retardada seguida de um religamento. Finalmente, as faltas permanentes serão sanadas com o bloqueio do religador ou a atuação da proteção a jusante (ANDERSON, 1999).

Como dito, o religador permite somente quatro operações, ou seja, três religamentos, antes que seja bloqueado. Na Figura 1 é possível observar a forma de onda da corrente para um ciclo completo de abertura e religamento até o bloqueio do religador. Sendo t_{at} o tempo de atuação do relé de sobrecorrente; t_{ac} e t_{fc} os tempos de abertura e fechamento dos contatos, respectivamente; e t_r o tempo de espera para o religamento.

O religador, quanto ao número de fases, pode ser classificado como monofásico ou trifásico. O dispositivo monofásico é destinado à proteção de redes monofásicas ou trifásicas que alimentam essencialmente cargas monofásicas. Desta forma, quando ele atua devido a uma falta fase-terra, as outras fases remanescentes não são afetadas. Já o religador trifásico é destinado à proteção de redes cujo seccionamento tripolar simultâneo é obrigatório. Desse modo, evita-se que cargas trifásicas fiquem ligadas somente em duas fases. Contudo, bancos de religadores monofásicos podem ser usados com o seccionamento tripolar simultâneo (GERS; HOLMES, 2011).

Os religadores de interrupção em óleo, normalmente utilizados em subestações, são dotados de três unidades diferentes (MAMEDE FILHO, 2013):

Figura 1 – Ciclo de operação do religador.



Fonte: Adaptada de Mamede Filho (2013).

- Unidade religadora: composta pela tampa, cuja função é fechar hermeticamente o religador, além de servir como base das buchas; pelas buchas de passagem, que têm como objetivo realizar a isolamento entre o circuito e a carcaça do equipamento, além de permitir a passagem do circuito de um ambiente para outro (neste caso o ambiente externo e interno do religador); pelos TCs; e pelo tanque, onde está localizado o óleo mineral, no qual estão imersos os TCs, a câmara de extinção e os contatos de abertura;
- Unidade de controle: é onde se encontra a chave de bloqueio de religamento, do comando local e do bloqueio da proteção de neutro; lâmpadas sinalizadoras; temporizadores dos intervalos de religamentos e rearmes; seletor de abertura instantânea; contador de religamento; indicador luminoso de operação; relé de religamento automático; amperímetros de demanda; e relés de sobrecorrente de fase e neutro;
- Unidade de baixa tensão: neste local se encontra o sistema mecânico de manobra, constituído pelo motor de acionamento das molas, pela mola de fechamento, pelo relé de desligamento e pelo relé de fechamento.

O tempo de rearme, o número de operações até o bloqueio e a quantidade de aberturas rápida e com retardo, bem como a sequência dessas operações são controladas pelo relé de religamento. Tal dispositivo é composto pelo (MAMEDE FILHO, 2013):

- Temporizador de intervalo de religamento: é dotado de três unidades, sendo que cada uma permite ser regulada de maneira independente. Normalmente o primeiro temporizador (t_{r_1}) é regulado na faixa de 0 a 120 s, em passos de 0 – 5 – 20 – 40 – 60 – 80 – 120 s. Já os temporizadores t_{r_2} e t_{r_3} são reguláveis de 5 a 120 s, com os mesmos passos do primeiro;

- Contador de religamento: esta função limita o número de operações consecutivas de abertura que podem ser executadas antes do bloqueio do religador. Essa função pode ser ajustada em 1, 2, 3 ou 4;
- Seletor de aberturas sucessivas: permite ajustar o número de operações consecutivas de abertura que o religador deve executar. Tal função pode ser ajustada em 0, 1, 2, 3 ou 4;
- Temporizador de rearme.

Desta forma, segundo Mamede Filho e Mamede (2011), para utilizar o religador, deve-se:

- Ajustar as proteções de fase e neutro (unidades instantâneas ou de tempo definido e unidades temporizadas) considerando a mínima corrente de curto-circuito e a máxima corrente de carga;
- Definir a sequência de operação, ou seja, o ciclo de religamento;
- Ajustar o tempo de religamento de modo a obter coordenação e seletividade entre os equipamentos de proteção;
- Definir o tempo de rearme do religador (t_{rr}), que pode ser dado pela Equação 2.3.

$$t_{rr} = 1,10 \times \sum t_{op} + 1,15 \times \sum t_{cl} \quad (2.3)$$

onde t_{op} é o tempo da operação de abertura ($t_{at} + t_{ac}$), considerando a mínima corrente de curto-circuito, e t_{cl} é o tempo da operação de fechamento ($t_r + t_{fc}$).

2.6 Seccionadores Automáticos

Embora os seccionadores automáticos estejam fora do escopo desta tese, não é demais explicar seu funcionamento, uma vez que são dispositivos empregados no sistema de proteção do SD, e que podem ser contemplados pela metodologia proposta, sem a necessidade de nenhuma alteração.

Os seccionadores automáticos, ou somente seccionadores, têm a função de abrir definitivamente o circuito enquanto ele está desconectado, ou seja, logo após a abertura do equipamento de proteção a montante. A sua utilização é normalmente feita no lugar de chaves fusíveis, pois permite: (i) a total coordenação com religadores a montante; (ii) a eliminação da operação monopolar característica das chaves fusíveis; (iii) a redução dos erros de coordenação entre religadores e fusíveis; e (iv) a eliminação da manutenção (troca) dos elos fusíveis (MAMEDE FILHO, 2013).

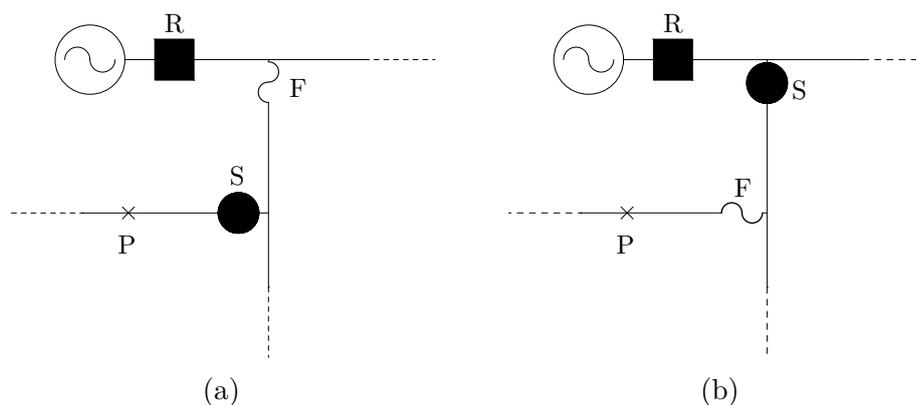
Após um pré-determinado número de interrupções, o seccionador pode ser programado para abrir o circuito desenergizado. Isso permite que os seus contatos não precisem interromper correntes de falta, tornando a fabricação mais simples e econômica. Assim, o seccionador é essencialmente um detector de faltas, um contador e uma chave, porém não possui uma característica de operação por tempo *vs.* corrente. Além disso, pode ser tanto monofásico quanto trifásico, bem como possuir um controle hidráulico ou eletrônico (ANDERSON, 1999).

Os seccionadores hidráulicos possuem uma bobina de operação em série com a linha. Cada vez que ocorre uma sobrecorrente, a bobina aciona um pistão que ativa o contador quando o circuito está aberto e a corrente é zero. Depois de um número de abertura pré-determinado, os contatos do seccionador são abertos por meio de molas pré-tensionadas. Já os seccionadores eletrônicos possuem uma operação mais flexível e são mais fáceis de ajustar. Neste caso, a sobrecorrente é medida por meio dos TCs e um circuito eletrônico é responsável por realizar a contagem e enviar um sinal de *trip* para o elemento de abertura (GERS; HOLMES, 2011).

Para o correto dimensionamento do seccionador é necessário verificar: (i) se a tensão e a corrente nominal são iguais ou maior que os máximos valores de tensão e corrente obtidos no ponto de instalação; (ii) se a capacidade de curto-circuito é superior ou igual ao nível de falta do ponto de instalação; e (iii) se a coordenação com os outros equipamentos de proteção a jusante e a montante é possível.

Existem duas maneiras de instalar o seccionador (S). Na primeira (Figura 2a), o fusível (F) se encontra a montante do seccionador e não há mais nenhuma proteção a jusante. Suponhamos que o religador (R), localizado na subestação, seja ajustado para duas operações rápidas e duas retardadas. Para uma falta a jusante do seccionador, o fusível somente atuaria após o segundo religamento do religador. Se o seccionador for ajustado para operar após uma operação de religamento, ele irá atuar após a segunda operação do religador, ou seja, durante o segundo tempo de religamento (t_{r_2}), e o fusível, caso seja necessário, após esta operação de religamento, ou seja, durante o tempo de atuação retardada do religador (t_{at_3}). Isto assegura, portanto, a continuidade do fornecimento de energia elétrica para todas as cargas conectadas a montante do seccionador. Já a segunda maneira de instalar tal equipamento (Figura 2b) consiste em inseri-lo a montante do fusível, ou seja, entre o religador e o fusível. Neste caso, é necessário mudar o ciclo de atuação do religador para uma operação rápida e três retardadas. Assim, o fusível atuaria após o primeiro religamento, ou seja, durante a atuação retardada do religador (t_{at_2}) e o seccionador, caso preciso, iria operar durante o terceiro intervalo de religamento do religador (t_{r_3}).

Figura 2 – Exemplos de instalação do seccionador.



Fonte: Elaborada pelo autor.

2.7 Coordenação entre os Dispositivos de Proteção

Nesta seção serão apresentadas as metodologias para a coordenação entre os dispositivos de proteção destinados ao SD, ou seja, entre fusível-fusível, religador-fusível e religador-religador.

2.7.1 Seletividade fusível-fusível

Segundo Mamede Filho e Mamede (2011), alguns pontos devem ser levados em consideração durante a coordenação entre dois fusíveis:

- Para uma correta coordenação entre dois elos fusíveis, deve-se adotar um tempo máximo de interrupção para o elo fusível protetor, menor que 75% do tempo mínimo de fusão do elo fusível protegido (Equação 2.4).

$$t_{max}^{fp} \leq 0,75 \times t_{min}^{fb} \quad (2.4)$$

onde t_{max}^{fp} representa o maior tempo de atuação do elo fusível protetor e t_{min}^{fb} o menor tempo de atuação do elo fusível protegido;

- Não instalar mais do que duas chaves fusíveis em série, tendo em vista a difícil coordenação para um número elevado de chaves. Caso seja necessário um número maior de equipamentos de proteção, devem ser utilizados religadores ou seccionadores;
- Coordenar o elo fusível protegido com o elo fusível protetor para a maior corrente de curto-circuito medida no ponto em que se encontra o elo fusível protetor. Além disso, devido à maior probabilidade de faltas fase-terra no SD (84% dos defeitos em alimentadores envolvem a terra), também é recomendado tentar coordenar os elos fusíveis para a menor corrente de curto-circuito fase-terra no ponto em que se encontra o elo fusível protetor.

De forma simplificada, muitos fabricantes fornecem tabelas para uma correta coordenação entre os fusíveis do mesmo tipo (H, K e T) e de tipos diferentes. Nessas tabelas são indicados os valores máximos das correntes de curto-circuito, nos quais os elos fusíveis coordenam entre si.

2.7.2 Coordenação religador-fusível

A coordenação entre religador e fusível vai depender da maneira como serão instalados os equipamentos (GERS; HOLMES, 2011). Se o fusível for instalado a montante do religador, ou seja, sendo *backup* do religador, então todas as operações do religador devem ser mais rápidas que o tempo mínimo de operação do fusível. Assim, esta configuração visa preservar o fusível para faltas a jusante do religador, mantendo ainda o religamento do sistema elétrico. Contudo, tal modo de instalação não é usual, tendo em vista a necessidade da utilização de fusíveis de elevada corrente nominal, além de não haver um benefício significativo para este tipo de coordenação.

Quando o fusível é instalado a jusante do religador, ou seja, o religador torna-se um *backup* do fusível, duas coordenações diferentes podem ser realizadas:

- a do tipo *fuse-saving*: esta filosofia de coordenação visa fazer com que o religador atue para faltas temporárias e o fusível para curtos-circuitos permanentes. Para tanto, a curva de tempo mínimo do fusível deve estar acima da curva de operação rápida do religador. Além disso, a curva de máxima fusão do fusível deve estar abaixo da curva de operação retardada do religador.

O benefício dessa coordenação é que se evita a fusão do fusível devido às faltas temporárias que ocorrem no SD. Contudo, é necessário garantir que a operação retardada do religador tenha um tempo superior a todos os tempos máximos de fusão dos fusíveis a jusante. Dependendo da corrente nominal dos fusíveis, eles podem ter um tempo elevado de fusão, fazendo com que a curva retardada do religador também retorne longos tempos, mesmo considerando uma falta próxima a este equipamento.

- a do tipo *fuse-blowing*: esta filosofia de coordenação tem como objetivo a queima do fusível para qualquer tipo de curto-circuito que ocorra no SD. Desta forma, o tempo máximo de fusão do fusível deve ser inferior ao menor tempo de atuação do religador.

O benefício dessa coordenação é que a desconexão de uma grande área do SD é evitada, mesmo que temporariamente, devido à atuação do religador. Contudo, a atuação do fusível, para qualquer tipo de falta, aumenta o custo de operação da rede, tendo em vista a necessidade do deslocamento de uma equipe para a substituição do elo fusível queimado.

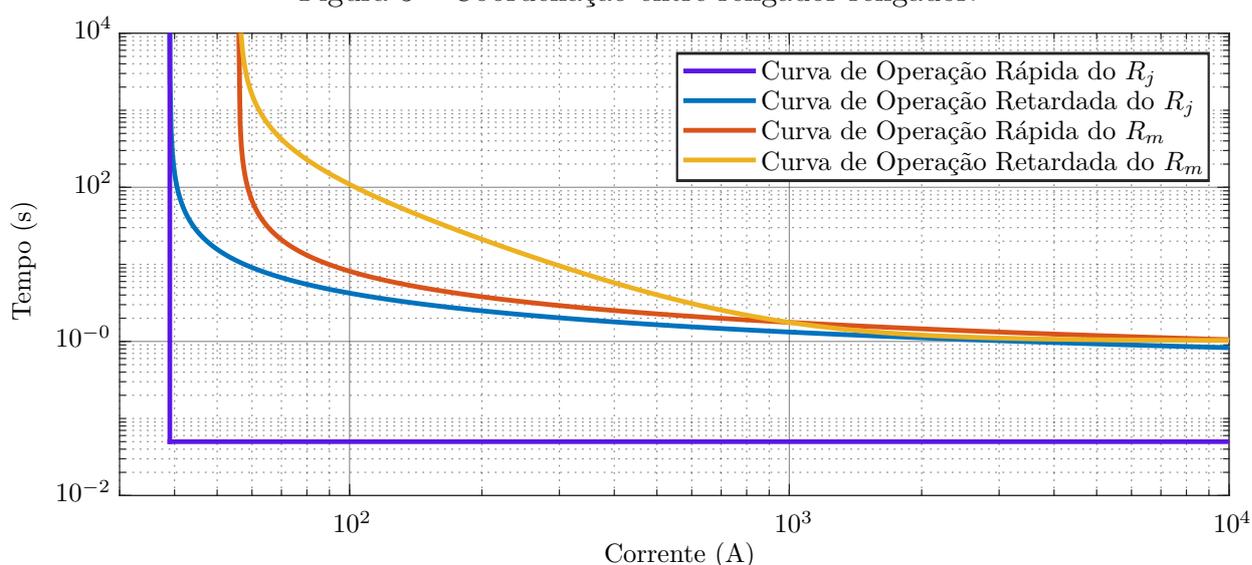
2.7.3 Coordenação religador-religador

Na coordenação entre dois religadores, uma das duas metodologias apresentadas a seguir pode ser adotada, dependendo dos recursos disponíveis nos equipamentos e da infraestrutura da concessionária.

A primeira metodologia consiste em ajustar a atuação rápida do religador a jusante (chamado de R_j neste exemplo) de modo que ele retorne um tempo de operação baixo (normalmente adota-se uma curva instantânea com tempo de operação de 0,05 s). Em seguida, a atuação retardada do R_j é ajustada com base nos tempos máximos de ruptura dos fusíveis que se encontram dentro da sua zona de proteção, considerando uma filosofia do tipo *fuse-saving*.

Tendo as duas curvas do R_j ajustadas, define-se a atuação rápida do religador a montante (chamado de R_m neste exemplo) de modo que esta fique acima da curva de atuação retardada do R_j , conforme mostrado na Figura 3. Assim, garante-se que o tempo de operação do R_m será sempre superior ao maior tempo de atuação do R_j , o que evita uma sequência de atuação intercalada entre os dois equipamentos e, portanto, indevida do R_m . Por fim, a curva de operação retardada do R_m é ajustada com base nos tempos máximos de ruptura dos fusíveis que se encontram dentro da sua zona de proteção. Deve-se observar que os fusíveis, dentro da zona de proteção do R_m , devem ter um tempo mínimo de ruptura superior ao tempo de atuação rápida do religador R_m para obter a coordenação *fuse-saving*.

Figura 3 – Coordenação entre religador-religador.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 3, para obter a coordenação apresentada, foi utilizada uma curva instantânea para o religador a jusante (R_j), com tempo de operação de 0,05 s (operação rápida), e uma curva temporizada moderadamente inversa com múltiplo de tempo de 1,5

(operação retardada). Já para o religador a montante (R_m), foram empregadas duas curvas temporizadas, moderadamente inversa com múltiplo de tempo de 1,8 (operação rápida) e extremamente inversa com múltiplo de tempo de 8,4 (operação retardada). Vale ressaltar que as curvas são baseadas nos dados de parâmetros retirados da IEEE *Std* C37.112 (IEEE, 2019).

Pode-se observar, com base na Figura 3 e nos dados das curvas, que esta metodologia pode acarretar em elevados tempos para a atuação rápida do religador a montante, principalmente nos casos em que há necessidade de se aumentar o tempo da operação retardada do religador a jusante, devido a um fusível com ruptura lenta em sua zona de proteção. Também, esta metodologia pode acarretar na utilização de fusíveis com tempos de ruptura elevados dentro da zona de proteção do R_m , tendo em vista que há a necessidade de respeitar a curva de operação rápida deste religador. Por fim, o emprego de mais religadores no sistema elétrico pode ser inconveniente, dado que o religador mais próximo da subestação teria um tempo de atuação rápida muito elevado.

Uma forma de amenizar esses problemas seria adotar a segunda metodologia, que consiste em utilizar um esquema de bloqueio e transferência de *trip* entre o religador a jusante e o religador a montante. Esta metodologia permite que o religador a montante opere, devido à atuação rápida, em um tempo menor, próximo ao tempo de operação rápida do religador a jusante, porém ainda acima da curva do religador a jusante.

Considerando a Figura 3, para esta metodologia, a atuação rápida do R_m poderia ser fixada em 0,10s, tendo em vista que R_j atuaria em 0,05s, bloqueando o religador a montante. Com isso, poderiam ser adotados fusíveis com tempo de ruptura menor, dentro da zona de proteção do R_m e, conseqüentemente, também poderia ser reduzido o seu tempo de operação devido à curva retardada. Contudo, para a adoção desta metodologia, é necessário o emprego de uma comunicação e de uma lógica de bloqueio e transferência de *trip* entre os religadores, o que pode aumentar os custos envolvidos com a instalação dos equipamentos.

2.8 Considerações Finais

O presente capítulo foi apresentado no sentido de proporcionar ao leitor uma compreensão sobre o sistema de proteção, principalmente no que se refere ao destinado ao SD. Para tanto, inicialmente foi feito um resgate a respeito dos conceitos gerais do sistema de proteção. Na sequência, foi realizada uma abordagem sobre as chaves fusíveis, mostrando as características técnicas, bem como aspectos referentes ao dimensionamento. Também foram apresentados os conceitos dos religadores, mostrando suas características operacionais. Em seguida, foi feita uma explicação sobre os seccionadores, mesmo não sendo considerados equipamentos de proteção, tendo em vista se tratarem de dispositivos auxiliares ao sistema de proteção (manobra). Por fim, foi discutida a coordenação dos

dispositivos de proteção, considerando os possíveis arranjos encontrados no SD. Assim, os capítulos posteriores apresentarão a metodologia e implementação computacional dos fusíveis e religadores, bem como a lógica por trás do ajuste automático do múltiplo de tempo e da corrente de *pick-up*, e os resultados de sua utilização.

3 METODOLOGIA E IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

3.1 Considerações Iniciais

Com base no conhecimento exposto no Capítulo 2 sobre o funcionamento, estrutura e coordenação dos equipamentos de proteção utilizados no SD, é possível iniciar com a análise/simulação computacional desses dispositivos, juntamente com os ajustes adaptativos propostos. Para isso, foi utilizado o *software* PSCADTM/EMTDCTM, o qual é apresentado a seguir. Inicialmente, será detalhado o funcionamento/obtenção dos ajustes adaptativos do múltiplo de tempo e da corrente de *pick-up* do religador, objetivo principal deste trabalho. Por fim, será exposta a implementação computacional dos equipamentos de proteção utilizados nesta tese, ou seja, a modelagem do religador adaptativo e convencional, bem como dos fusíveis, mostrando quais considerações foram empregadas em cada equipamento.

3.2 *Software* PSCADTM/EMTDCTM

A necessidade de analisar os distúrbios que ocorrem no sistema elétrico, juntamente com o aumento da complexidade dos processos operacionais, exigem diversos estudos complexos no domínio do tempo. Por isso, é imprescindível a utilização de ferramentas de simulação precisas e intuitivas, tanto na área acadêmica quanto na industrial. Por meio de estudos oriundos dos *softwares* de simulação, é possível chegar às causas de vários fenômenos que ocorrem ou podem ocorrer no sistema elétrico e, com isso, medidas podem ser tomadas de modo a tornar o sistema eficaz e confiável.

O *Power Systems Computer Aided Design/Electromagnetic Transients including DC* – PSCADTM/EMTDCTM é um *software* de *interface* gráfica para simulação digital no domínio do tempo, que visa o estudo de fenômenos transitórios de natureza eletromagnética em sistemas elétricos. Trata-se de um *software* desenvolvido no Canadá pela Manitoba-HVDC, com mais de 40 anos de pesquisa e desenvolvimento, visando tornar sua biblioteca a mais abrangente possível. Atualmente conta com modelos de sistemas que vão desde elementos passivos simples e funções de controle até máquinas elétricas e outros dispositivos complexos.

Além de oferecer uma *interface* gráfica amigável, que permite aos usuários construir circuitos esquemáticos de forma eficiente, o PSCADTM/EMTDCTM se diferencia de outros *softwares* de simulação por várias razões, dentre elas (Manitoba-Hdvc Research Centre, 2010):

- Preparação e tempo de teste reduzido devido à *interface* gráfica;

- Diversos elementos em série e em paralelo têm suas representações reduzidas de forma a diminuir a quantidade de nós;
- O algoritmo de ordenação ideal aumenta a velocidade da decomposição da matriz LDU;
- Não há restrição de como os elementos do circuito podem ser combinados. Pode-se utilizar qualquer quantidade de elementos necessários em série ou em paralelo.
- Os dispositivos de chaveamento ou fonte podem ser ou não ideais;
- Facilidade na criação de modelos próprios por parte do usuário;
- Pode-se utilizar as linguagens Fortran, C e MATLAB;
- Inicialização da simulação a partir de um arquivo de pré-inicialização (*Snapshot File*).

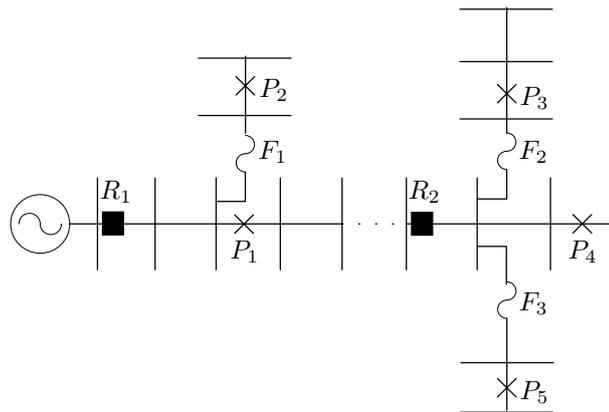
Diante do que foi apresentado, destaca-se a capacidade de criação de modelos e o uso de outras linguagens de programação. Com isso, todo o controle do religador proposto foi escrito em Fortran, diretamente na janela do *script* de definição do componente, e outras rotinas auxiliares/complementares foram escritas em linguagem C, as quais são incorporadas no *script* principal, durante as simulações, pelo próprio PSCADTM/EMTDCTM.

3.3 Ajuste Adaptativo do Religador

O emprego de uma correta coordenação entre os dispositivos de proteção, mesmo aplicando técnicas de otimização visando minimizar os tempos de operação, não garante que o sistema de proteção dos SDs seja eficiente. Ao utilizar a proteção convencional, é necessário garantir que o tempo de atuação retardada do religador esteja acima do maior tempo de atuação dos fusíveis a jusante. Dependendo da corrente nominal dos fusíveis, o tempo de operação do religador pode ser consideravelmente elevado, mesmo sendo o dispositivo de proteção primário.

Tomando a Figura 4 como exemplo e assumindo que os pontos de falta P_1 e P_2 possuem a mesma corrente de curto-circuito, o religador R_1 apresentará o mesmo tempo de operação na curva retardada em ambas as faltas (supondo que há uma falha de ruptura do fusível F_1). No entanto, R_1 poderia ter um tempo de operação menor quando a falta está localizada em P_1 , pois não há outro dispositivo de proteção entre R_1 e P_1 . O mesmo vale para o religador R_2 , se considerarmos que os pontos de falta P_3 , P_4 e P_5 possuem as mesmas correntes de curto-circuito. Além disso, neste caso, se a corrente nominal do fusível F_3 for maior que F_2 , R_2 atuaria com o mesmo tempo em ambos os casos (devido à curva retardada e considerando a falha dos fusíveis), mesmo que F_2 tenha um tempo de ruptura menor que F_3 .

Figura 4 – Sistema para explicação do ajuste automático do múltiplo de tempo do religador.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Outro ponto importante em que a proteção convencional não é eficiente diz respeito às mudanças de carga e topologia do sistema elétrico. Sabe-se que no SD há variações de carga ao longo do dia, sendo comum encontrar três categorias de patamares: carga leve, média e pesada. Além disso, devido aos chaveamentos ou mesmo entrada/saída de GDs, podem ocorrer alterações de topologia no sistema elétrico que geram correntes de curto-circuito maiores ou menores. No entanto, o ajuste da proteção convencional é fixo e não se adapta às mudanças que ocorrem no SD. Tal característica pode resultar em um falso *trip* (devido a um ajuste que não se adequa a uma extrapolação do patamar de carga pesada) ou, nos casos mais graves, em uma perda de sensibilidade da proteção (devido à mudança na corrente de falta), principalmente para faltas de maior resistividade.

Diante disso, um dos objetivos desta pesquisa é realizar o ajuste da curva retardada do religador, de modo a reduzir o tempo de atuação devido à localização do curto-circuito. Assim, o múltiplo de tempo do religador será ajustado de acordo com os dispositivos de proteção envolvidos na falta. Também será apresentado um ajuste automático da corrente de *pick-up*, conforme o valor da corrente do sistema elétrico, visando tornar a proteção autoadaptativa às mudanças que ocorrem no SD. Para tanto, os religadores devem estar equipados com comunicação para poderem receber e enviar dados para os demais equipamentos de proteção.

3.3.1 Ajuste automático do múltiplo de tempo do religador

Tendo em vista a adoção da coordenação *fuse-saving*, a proposta de ajuste do múltiplo de tempo do religador se aplica à curva de atuação retardada. Isso se deve ao fato de que a primeira operação do sistema de proteção será sempre devido à curva rápida do religador que, se bem parametrizada, já possui um tempo de operação baixo. Somado a isso, o intervalo de religamento do dispositivo permite que as trocas de dados e cálculos necessários sejam realizados.

Perante o exposto, o ajuste do múltiplo de tempo do religador pode ser dividido em duas situações: na primeira, o religador é o dispositivo de proteção primário; na segunda, o fusível é o dispositivo de proteção primário.

- Religador como dispositivo de proteção primário:

Com base na Figura 4, para uma falta no ponto P_1 , somente o religador R_1 será sensibilizado. Neste caso, como não há necessidade de realizar a coordenação com nenhum outro dispositivo de proteção a jusante, pode-se adotar o menor múltiplo de tempo para a atuação retardada, que no caso deste trabalho é 0,05. Assim, quando uma falta permanente for aplicada em P_1 , R_1 atuará de acordo com os dados da curva e múltiplo de tempo definidos para a atuação rápida e, após, será conforme os dados da curva de atuação retardada com múltiplo de tempo igual a 0,05.

No caso de uma falta no ponto P_4 da Figura 4, o religador R_2 terá o múltiplo de tempo da curva retardada ajustado para o menor valor, pois não há outro dispositivo de proteção a jusante. Da mesma forma, o religador R_1 também terá seu múltiplo de tempo da curva retardada ajustado em 0,05, pois, independentemente da metodologia adotada (conforme subseção 2.7.3), a atuação pela curva retardada sempre ocorre após a operação devido à curva rápida. Salienta-se que o esquema de bloqueio e transferência de *trip*, apresentado na subseção 2.7.3, resulta em tempos de operação menores para R_1 em caso de falha na operação de R_2 .

- Fusível como dispositivo de proteção primário:

Quando a falta ocorre em P_2 , P_3 ou P_5 da Figura 4, o religador deixa de ser o dispositivo de proteção primário e passa a ser o dispositivo protegido. Assim, considerando a coordenação *fuse-saving*, após a atuação devido à curva rápida do religador, o fusível envolvido no curto-circuito permanente deve se romper. Em caso de falha de ruptura do fusível, o religador deve atuar com base nos ajustes da curva retardada e múltiplo de tempo calculado.

Para calcular o múltiplo de tempo da curva retardada do religador na presença de fusíveis, é necessário conhecer o tempo máximo de ruptura do fusível envolvido no curto-circuito. Para isso, são necessárias informações sobre a corrente no fusível durante a falta. Neste trabalho, foram adotadas duas metodologias (descritas a seguir) para determinar as correntes de curto-circuito nos fusíveis, visto que, na maioria das vezes, tais correntes são menores que as medidas pelo religador. Em ambos os casos, o religador precisa ter um banco de dados com informações da curva de tempo *vs.* corrente de cada categoria de fusível para o qual é *backup*.

1. A primeira metodologia consiste em utilizar medidores de corrente, em cada fase, instalados junto aos fusíveis (SEL, 2021a), os quais fornecem os valores dos módulos das correntes de curto-circuito ao religador. Assim, no momento que os medidores são sensibilizados, os valores das correntes de falta são encaminhados para o religador a montante, para que sejam realizados os cálculos dos tempos máximos de ruptura dos fusíveis e, conseqüentemente, a determinação do múltiplo de tempo da curva retardada do religador.
2. A segunda metodologia utiliza transmissores de falta instalados, em cada fase, junto aos fusíveis (SEL, 2021b), os quais, no momento da falta, sinalizam ao religador que existe uma corrente de curto-circuito passando por eles. A utilização de um transmissor ao invés de um medidor reduz o custo em mais de 70% (obtido por meio do valor do produto presente em (SEL, 2021a) e (SEL, 2021b)). Contudo, com o uso de transmissores, é necessário estimar a corrente de curto-circuito que passa pelo fusível, com base nas informações de topologia e de carregamento do SD.

O cálculo da corrente de falta que passa pelo fusível começa com a medição dos fasores de corrente e tensão pelo religador mais próximo da falta. A partir dessas medições, é calculada a queda de tensão até a barra onde o fusível está localizado. Tomando como exemplo a Figura 5 e considerando a presença de um religador entre as barras 1 e 2, o primeiro passo é determinar a tensão na barra 2. Para isso, a tensão na barra 2 é dada pela Equação 3.1, sendo $m = 2$ e $k = 1$. Este processo é repetido até a primeira barra na qual existe uma carga (barra i) ou um ramal lateral (barra j).

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{m_a} \\ \dot{V}_{m_b} \\ \dot{V}_{m_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{k_a} \\ \dot{V}_{k_b} \\ \dot{V}_{k_c} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{km_{aa}} & Z_{km_{ab}} & Z_{km_{ac}} \\ Z_{km_{ab}} & Z_{km_{bb}} & Z_{km_{bc}} \\ Z_{km_{ac}} & Z_{km_{bc}} & Z_{km_{cc}} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{I}_{km_a} \\ \dot{I}_{km_b} \\ \dot{I}_{km_c} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

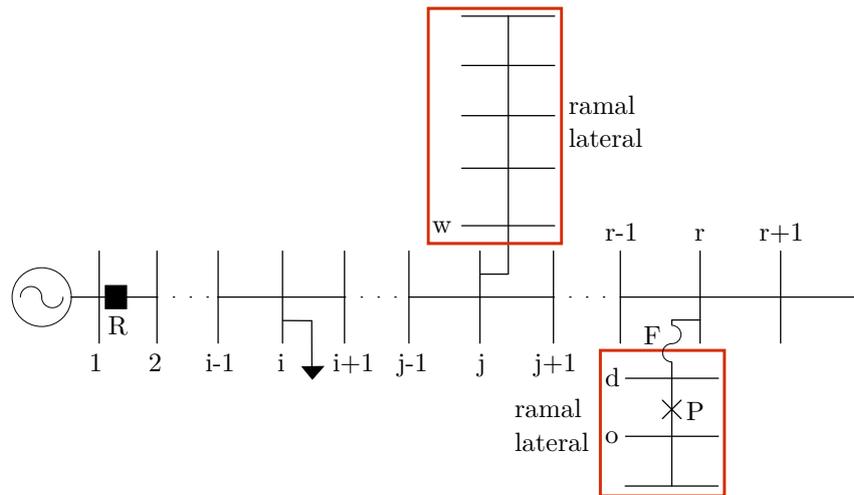
em que \dot{V}_m é o fasor da tensão resultante na barra m , \dot{V}_k é o fasor da tensão conhecida na barra k , Z_{km} é a matriz de impedância total da linha entre as barras k e m , e \dot{I}_{km} é o fasor da corrente da barra k para a barra m .

Caso haja uma carga conectada à barra k (representada pela barra i na Figura 5), é necessário descontar a influência dessa carga, para que o cálculo das tensões nas barras a jusante possa continuar. Para tanto, primeiramente é necessário atualizar a potência da carga em cada fase por meio da Equação 3.2 (KUNDUR, 1994).

$$S_i = \begin{cases} S_0 \times \left(\frac{V_i}{V_0}\right)^n & \text{para } V_i \geq 0,8 \\ S_0 \times \left(\frac{0,8}{V_0}\right)^n \times \left(\frac{V_i}{0,8}\right)^2 & \text{para } V_i < 0,8 \end{cases} \quad (3.2)$$

onde S_i é o vetor da potência aparente da carga i corrigida, S_0 é o vetor da potência aparente nominal da carga, V_i é o módulo da tensão medida na barra i , V_0 é o

Figura 5 – Sistema para explicação do cálculo da corrente de falta no fusível.



Fonte: Elaborada pelo autor.

módulo da tensão nominal da barra e n define a característica da carga, que pode ser potência ($n = 0$), corrente ($n = 1$) ou impedância ($n = 2$) constante.

Então a corrente por fase da barra i para a barra $i + 1$, ou barra m , é dada pela Equação 3.3.

$$\dot{I}_{i(i+1)} = \dot{I}_{(i-1)i} - \text{conj} \left(\frac{S_i}{\bar{V}_i} \right) \quad (3.3)$$

Se houver uma ramificação lateral na barra k (representada pela barra j na Figura 5), também é necessário subtrair a influência da corrente deste trecho. Para isso, é realizado um fluxo de potência neste ramal lateral baseado na Varredura Direta-Inversa. Este método consiste basicamente em adotar a tensão da subestação, ou neste caso da barra j , como sendo a tensão em todas as barras do ramal em análise. Em seguida, as correntes em cada barra que possui carga são calculadas usando a Equação 3.4.

$$\dot{I}_i = \text{conj} \left(\frac{S_i}{\bar{V}_i} \right) \quad (3.4)$$

Com as correntes de cada barra, é possível determinar as correntes em cada trecho de linha do ramal lateral, a partir da última barra, somando as correntes injetadas (varredura inversa). Por fim, as tensões são atualizadas por meio da Equação 3.1, a partir da tensão da barra j (varredura direta). Tendo as tensões nas barras atualizadas, as potências das cargas são ajustadas através da Equação 3.2 e as correntes injetadas são calculadas novamente, considerando, agora, as tensões atualizadas (Equação 3.4). Este processo é repetido em cada fase do ramal lateral até que não haja alterações significativas nas tensões das barras de uma interação para outra. Ao término, as

correntes da barra j para a barra w são subtraídas das correntes no trecho entre as barras $j - 1$ e j . Assim, é possível determinar as correntes entre as barras j e $j + 1$ (Figura 5).

Os cálculos das tensões, das correntes das cargas e das correntes dos ramais laterais são repetidos até que sejam obtidas as tensões na barra r e, conseqüentemente, as correntes entre as barras $r - 1$ e r . Como o curto-circuito se encontra em um ramal lateral (Figura 5), um fluxo de potência é realizado da barra r até o restante do sistema, sem considerar o ramal lateral sob falta. Desta maneira, é possível obter as correntes deste ramal lateral (Equação 3.5) e, conseqüentemente, as correntes que circulam pelos fusíveis envolvidos na falta (correntes de curto-circuito).

$$\dot{I}_{rd} = \dot{I}_{(r-1)r} - \dot{I}_{r(r+1)} \quad (3.5)$$

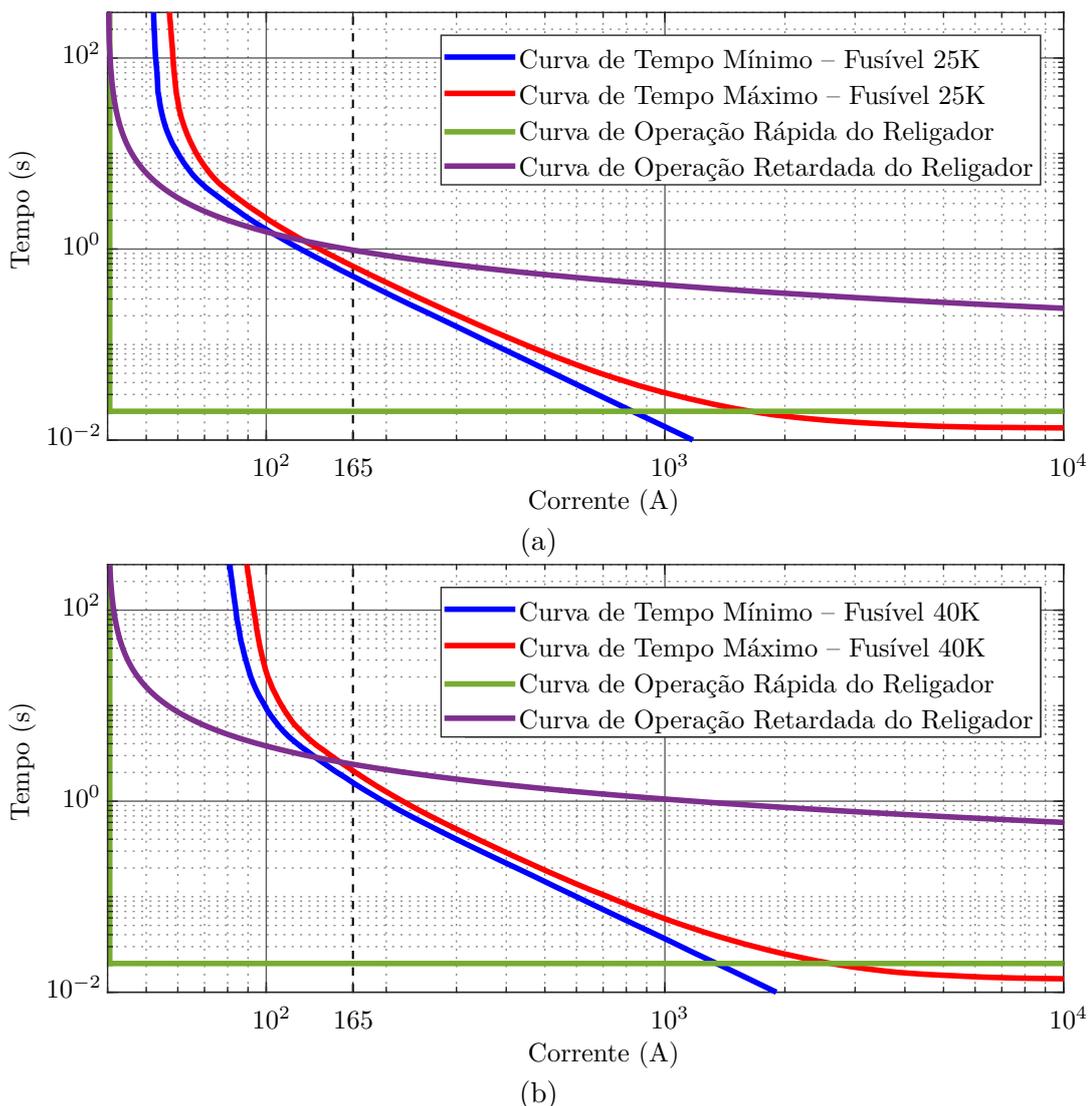
Deve-se observar que, se a falta estiver localizada no ramal principal, não é necessário calcular a corrente de curto-circuito, pois somente o religador será sensibilizado, ou seja, nenhum fusível estará envolvido na falta.

Ao empregar um dos métodos apresentados, o religador, com a informação da corrente que passa pelo fusível, calcula o tempo de ruptura considerando o banco de dados das curvas de tempo *vs.* corrente em sua memória. Em seguida, determina-se o múltiplo de tempo da curva de atuação retardada, de modo que o tempo de operação do religador esteja próximo ao tempo máximo de ruptura do fusível, porém maior e respeitando também o Intervalo de Tempo de Coordenação (ITC). Como exemplo, é apresentada a Equação 3.6, que calcula o múltiplo de tempo (MT) considerando a norma IEEE C37.112 (IEEE, 2019).

$$MT = \frac{t_{at} \times \left[\left(\frac{I_f^r}{I_p} \right)^p - 1 \right]}{A + B \times \left[\left(\frac{I_f^r}{I_p} \right)^p - 1 \right]} \quad (3.6)$$

onde I_f^r é o módulo da corrente de falta medida pelo religador, I_p é a corrente de *pick-up* do religador e A , B e p são os termos que definem a curva de operação.

A Figura 6 mostra o ajuste do múltiplo de tempo da curva retardada do religador baseado no fusível envolvido na falta. Considerando uma corrente de falta de 165 A, na primeira situação (Figura 6a) o religador é autoajustado para um fusível de 25K. Pode-se observar que a primeira atuação do religador é devido à operação instantânea e, durante o intervalo de religamento, o múltiplo de tempo da curva de operação retardada é ajustado para 0,2. Já na Figura 6b, para uma mesma corrente de falta, o religador tem seu múltiplo de tempo ajustado em 0,5, considerando que se trata de um fusível com corrente nominal maior (40K) envolvido no curto-circuito e, conseqüentemente, um tempo de ruptura máximo maior.

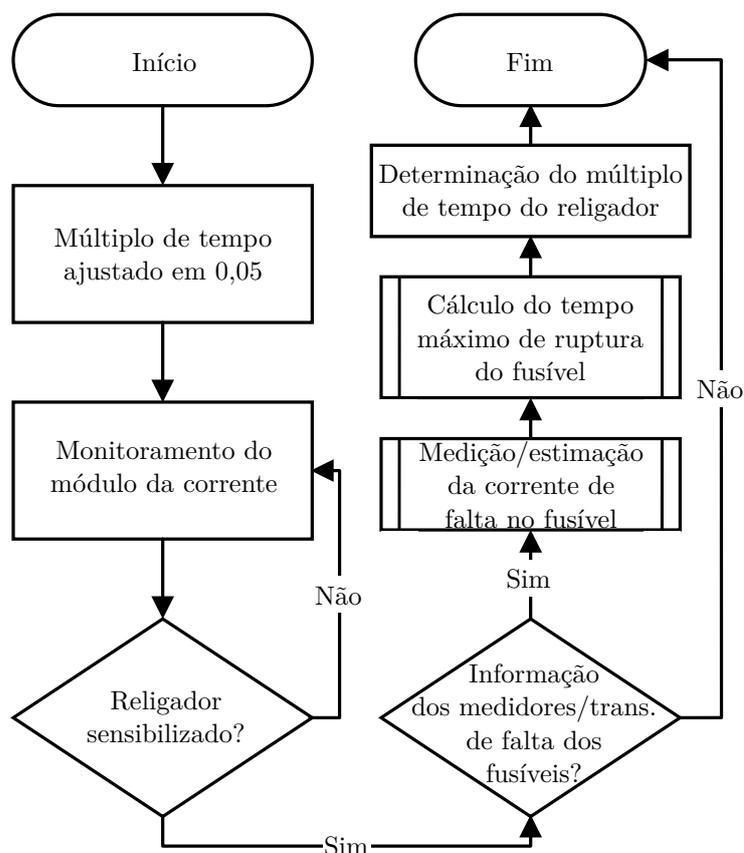
Figura 6 – Coordenação entre religador e fusíveis. $I_p^r = 40,0$ A.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 7 apresenta resumidamente as etapas realizadas para ajustar o múltiplo de tempo do religador. Primeiramente, o múltiplo de tempo está no seu valor mínimo (0,05). Caso o religador seja sensibilizado, ele verifica se recebeu alguma informação dos medidores de corrente ou alguma *flag* dos transmissores de falta (dependendo da metodologia adotada). Caso algum dado tenha chegado ao religador, significa que há um fusível envolvido no curto-circuito e então é necessário obter o valor da corrente de falta passante no fusível e, conseqüentemente, o tempo de fusão. Caso contrário, significa que ocorreu um curto-circuito no alimentador principal e não há nada para ajustar.

Na presença de dois ou mais religadores, como mostrado na Figura 4, e com uma falta permanente envolvendo o fusível (como exemplo um curto-circuito no ponto P_3), o religador mais distante da falta, no caso R_1 , será bloqueado pelo R_2 ou, devido ao ajuste da curva rápida, ele atuará depois de R_2 (assumindo falha do fusível e do R_2). Contudo,

Figura 7 – Fluxograma do ajuste autoadaptativo do múltiplo de tempo do religador.



Fonte: Elaborada pelo autor.

em ambos os casos, o múltiplo de tempo da curva retardada do R_1 permanecerá no valor inicial, ou seja, no menor valor possível.

Em SDs que possuem dois ou mais fusíveis em série, o ajuste do múltiplo de tempo proposto para o religador sempre considerará o tempo de ruptura do fusível mais próximo do religador. Isso se deve ao fato de que a atuação da proteção ocorre do dispositivo mais próximo para o mais distante da falta e sempre com coordenação par a par. Assim, a quantidade de medidores de corrente ou transmissores de falta nem sempre será igual à quantidade de fusíveis presentes no sistema elétrico.

Por fim, ressalta-se que o ajuste proposto do múltiplo de tempo pode ser realizado tanto na proteção de fase quanto na de neutro do religador. Com base nas correntes de fase medidas pelo religador e nos respectivos tempos de ruptura dos fusíveis, o maior múltiplo de tempo calculado entre as fases envolvidas no curto-circuito será utilizado na curva de operação retardada da proteção de fase. Por outro lado, a atuação retardada da proteção de neutro terá seu múltiplo de tempo definido levando em consideração a corrente de neutro medida pelo religador e todos os tempos de ruptura dos fusíveis envolvidos na falta.

3.3.2 Ajuste automático da corrente de *pick-up*

O ajuste da corrente de *pick-up* da proteção de fase do religador visa melhorar a sensibilidade do equipamento perante modificações que possam ocorrer na corrente do sistema elétrico. Desta forma, o valor da corrente do SD é constantemente medido e, dependendo dessas medições, a corrente de *pick-up* é ajustada automaticamente.

O nível de ajuste da corrente de *pick-up* depende de alguns fatores que podem ocorrer no SD. Como exemplo, pode-se citar a magnitude das variações das cargas e das GDs conectadas ao sistema. Neste trabalho foi adotado um nível de ajuste da corrente de *pick-up* correspondente a 150% da corrente medida, ou seja, considerando uma corrente medida de 100 A pelo religador, o ajuste da corrente de *pick-up* será de 150 A. Ademais, de modo a evitar valores muito baixos ou altos, foi considerado um valor mínimo de 50 A e um máximo de 1000 A para a corrente de *pick-up*.

Quando há um aumento na corrente medida no SD por um determinado intervalo de tempo (cerca de alguns segundos), inicia-se o ajuste automático da corrente de *pick-up* para um valor superior. Por outro lado, quando há uma redução da corrente do SD, a corrente de *pick-up* só será reduzida após um tempo relativamente longo (cerca de algumas horas). Este maior período de espera serve para evitar mudanças na corrente de *pick-up* devido a rápidas variações de carga ou GD. Neste trabalho, visando reduzir o esforço computacional, foi adotado um intervalo de 30 ms para o aumento da corrente de *pick-up* e de 60 ms para a redução. No entanto, esses valores devem ser aumentados, ao usar o dispositivo na prática, para algo próximo de 60 segundos (em caso de aumento de corrente) e 1 hora (em caso de diminuição de corrente).

Ressalta-se que os valores dos tempos apresentados acima, bem como o percentual para ajuste da corrente de *pick-up*, são dados como sugestões ao leitor, ficando a cargo de uma análise mais profunda considerando o sistema em estudo. A título de comparação, em ELOS (2019) é apresentado um indicador de falta comercial que possui um autoajuste da corrente de *pick-up* para quatro vezes a corrente do sistema. As modificações são realizadas quando há um aumento da corrente medida por mais de 60 segundos e quando há uma redução por 72 horas. Contudo, este intervalo para a redução não é indicado para o ajuste autoadaptativo da corrente de *pick-up* do religador, tendo em vista ir à contramão da proposta de ajuste deste trabalho, cujo objetivo é tornar o religador mais sensível às variações de corrente que ocorrem no sistema elétrico.

Supondo, inicialmente, que o religador tenha o ajuste da corrente de *pick-up* definido em 225 A, tendo em vista uma medição de uma corrente de 150 A. Se, ao longo do tempo, a corrente do sistema elétrico aumentar e sustentar esse aumento por 60 segundos, o religador realizará um novo ajuste da corrente de *pick-up* considerando o valor médio calculado durante este intervalo de tempo. Porém, se esse aumento não for sustentado, ou

seja, se tiver uma medição com valor abaixo de 150 A, a corrente de *pick-up* não sofrerá alteração. O mesmo vale para uma redução na corrente medida. Neste caso, o valor da corrente do sistema elétrico deve ser mantido abaixo da corrente de 150 A por 1 hora para que a mudança ocorra. Esta modificação considerará novamente o valor médio calculado durante o intervalo. O algoritmo 1 apresenta a lógica proposta para o ajuste automático da corrente de *pick-up*.

Algoritmo 1: Ajuste autoadaptativo da corrente de *pick-up* do religador

```

 $I\_pickup \leftarrow 1,5 * I\_medida;$ 
 $trip \leftarrow 0;$ 
1 while  $trip \neq 1$  do
    if  $I\_pickup > I\_medida$  then
        if  $I\_medida * 1,5 > I\_pickup$  then
            Armazena a corrente medida por 60 segundos;
            if  $MIN(I\_armazenado) * 1,5 > I\_pickup$  then
                 $I\_pickup \leftarrow MEDIA(I\_armazenado) * 1,5;$ 
            end
        else
            Armazena a corrente medida por 1 hora;
            if  $MAX(I\_armazenado) * 1,5 < I\_pickup$  then
                 $I\_pickup \leftarrow MEDIA(I\_armazenado) * 1,5;$ 
            end
        end
    else
         $trip = 1;$ 
    end
    if  $I\_pickup < 50$  then
         $I\_pickup \leftarrow 50$ 
    end
    if  $I\_pickup > 1000$  then
         $I\_pickup \leftarrow 1000$ 
    end
end

```

Durante a falta, mesmo que a corrente medida seja maior que as medições anteriores e, em alguns casos, sendo sustentada por um longo tempo, o ajuste da corrente de *pick-up* não é alterado. Isto é devido ao acionamento do religador que bloqueia qualquer alteração na corrente de *pick-up*. Assim, só há alterações enquanto o dispositivo de proteção não estiver sensibilizado.

Por fim, cabe comentar que o ajuste automático da corrente de *pick-up* pode ter algumas consequências negativas quando há mais de um religador no SD. Como visto, na presença de dois ou mais religadores, é necessário aplicar, preferencialmente, o esquema de bloqueio e transferência de *trip*. Entretanto, se forem utilizadas curvas de tempo *vs.* corrente para atuação rápida, não há garantia de que, com a alteração da corrente de

pick-up dos religadores, haverá coordenação e seletividade entre os equipamentos. Este fato é agravado quando o fluxo de potência no SD não é unidirecional. Uma solução para este problema é adotar ajustes fixos para a atuação rápida do religador.

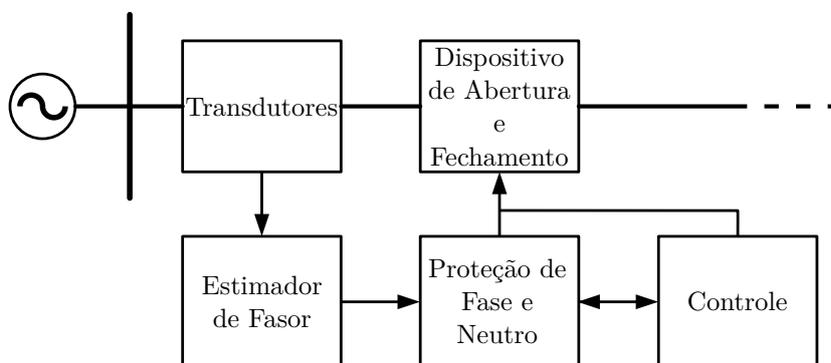
3.4 Implementação Computacional dos Equipamentos de Proteção no Software PSCAD™/EMTDC™

Nesta seção, os modelos dos religadores e fusíveis, bem como dos controles que fazem os ajustes do múltiplo de tempo e da corrente de *pick-up*, implementados no *software* PSCAD™/EMTDC™, serão apresentados.

3.5 Implementação do Religador

A implementação do religador foi dividida em duas etapas. A primeira corresponde ao religador convencional, ou seja, a modelagem das unidades de sobrecorrente e da lógica de atuação e rearme do equipamento. Esta etapa foi realizada, em sua maioria, com base nos componentes já existentes no PSCAD™/EMTDC™. A Figura 8 apresenta um diagrama de blocos com as principais estruturas do religador.

Figura 8 – Estrutura de funcionamento do religador convencional.



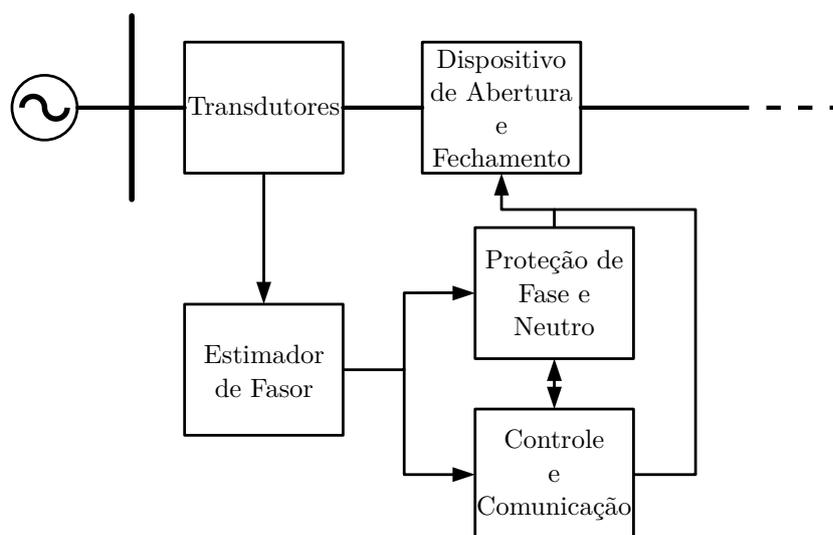
Fonte: Elaborada pelo autor.

O bloco dos transdutores, na Figura 8, representa os TCs utilizados nas simulações. Esses equipamentos foram modelados considerando uma relação de transformação ideal, ou seja, sem a presença da saturação. Com os valores das correntes já transformados, os fasores são estimados. Para isso, a Transformada Rápida de Fourier, já presente no PSCAD™/EMTDC™, foi utilizada para determinar os módulos dos sinais de corrente. Após o cálculo dos módulos das correntes, os valores são passados para o bloco de proteção de fase e neutro. Neste bloco, os tempos de atuação rápida e retardada do religador são calculados com base nos dados de curva e múltiplo de tempo inseridos. Para tanto, componentes de controle analógico e digital, já presentes no PSCAD™/EMTDC™, foram utilizados para enviar o sinal de *trip* para o bloco de abertura e fechamento.

O bloco de controle é responsável por comandar em qual curva de atuação o religador irá operar, ou seja, se o equipamento irá atuar devido a operação rápida ou retardada. Além disso, é responsável pela contagem do tempo de religamento e da quantidade de operações já realizadas, que visa o bloqueio do religador em caso de uma falta permanente. Para formar este bloco, também foram utilizados componentes de controle analógicos e digitais já presentes no PSCADTM/EMTDCTM. Ressalta-se que na implementação do religador foi considerado um tempo de abertura e fechamento de seus contatos de 0,05 s e 0,1 s, respectivamente, para representar os atrasos inerentes dos dispositivos reais (SCHNEIDER, 2017). Ademais, foi considerado um tempo mínimo de atuação de 0,05 s, ou seja, uma operação instantânea levaria 50 ms, referente ao tempo de abertura dos contatos do religador, para desconectar o circuito de fato.

A segunda etapa da implementação computacional do religador corresponde ao controle adaptativo que complementa o controle convencional apresentado. Para tanto, há a necessidade do bloco de controle se comunicar com o bloco da estimação de fasor, conforme mostrado na Figura 9. Além disso, quando transmissores de falta são usados para calcular o tempo de ruptura do fusível, há a necessidade de usar TPs no bloco dos transdutores, tendo em vista a necessidade de realizar os cálculos de queda de tensão. Diante disso, a partir dos módulos e ângulos das correntes e tensões fornecidos pelo estimador de fasor, juntamente com as informações recebidas pelos demais dispositivos, são realizados os ajustes propostos. Assim, o bloco de controle é responsável, além do que já foi apresentado para o religador convencional, por determinar o múltiplo de tempo da curva retardada e a corrente de *pick-up* que serão utilizados pelo bloco de proteção de fase e neutro. Para o religador adaptativo, diferentemente do convencional, foram utilizadas as linguagens Fortran e C na implementação do bloco de controle.

Figura 9 – Estrutura de funcionamento do religador adaptativo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como apresentado, a modelagem do bloco de controle adaptativo do religador deve considerar as comunicações efetuadas com os medidores de corrente ou transmissores de falta instalados junto com os fusíveis. Assim, é necessário que todos os dispositivos a jusante possuam um link de comunicação com o religador. No caso da utilização de medidores de corrente, o bloco de controle, além de determinar o tempo máximo de ruptura do fusível com base na corrente informada, calculará o múltiplo de tempo que satisfaça a coordenação. Nesta etapa, devido à "simplicidade", optou-se por utilizar a linguagem Fortran, de modo a trabalhar diretamente na janela do *script* do PSCAD™/EMTDC™. No entanto, ao utilizar transmissores de falta, a linguagem C foi utilizada para determinar a corrente de curto-circuito que passa pelo fusível, conforme os passos apresentados na subseção 3.3.1.

Durante o intervalo de religamento, definido neste trabalho como sendo 5 s para ambos os modelos de religadores implementados, são realizados os cálculos necessários para ajustar o múltiplo de tempo do religador adaptativo. Para este ajuste, os dados de corrente e tensão nos terminais do religador são obtidos próximos ao tempo de operação devido à curva rápida do dispositivo. Isso permite que as medições não levem em consideração os transitórios que ocorrem no momento em que o curto-circuito é aplicado.

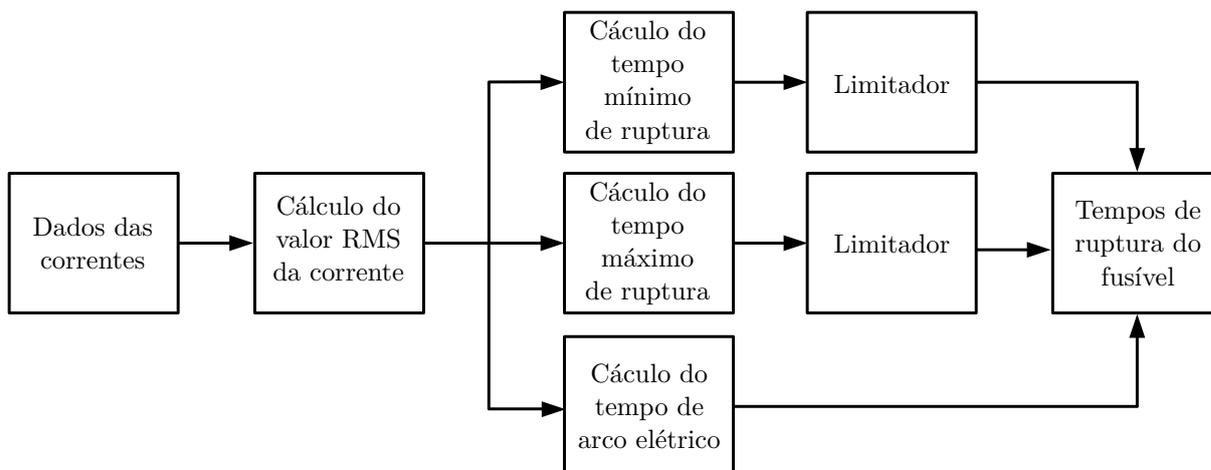
Por fim, o controle da corrente de *pick-up*, independentemente da adoção do medidor de corrente ou transmissor de falta, foi modelado na linguagem Fortran, diretamente na janela do *script* do PSCAD™/EMTDC™. Conforme já explicado na subseção 3.3.2, o módulo de corrente obtido pelo bloco de estimação de fasor é utilizado para ajustar o valor da corrente de *pick-up* considerando os atrasos de tempos apresentados.

3.6 Implementação do Fusível

Os fusíveis foram implementados utilizando os blocos já existentes no *software* PSCAD™/EMTDC™. O primeiro passo da modelagem do fusível é calcular o valor RMS do sinal de corrente medido no ponto de sua instalação. Em seguida, com base em um arquivo .txt, que relaciona a corrente com o tempo de ruptura, obtém-se o tempo de fusão do fusível por interpolação. Ressalta-se que nesta etapa são utilizados o triplo de blocos de interpolação, a fim de obter o tempo mínimo e máximo de ruptura do fusível e também o tempo de extinção do arco elétrico. Para evitar valores fora dos dados fornecidos nos arquivos .txt, ou seja, uma extrapolação dos tempos de ruptura, foi utilizado um limitador. Por fim, soma-se o tempo mínimo e máximo de ruptura do fusível ao tempo de extinção do arco elétrico. A Figura 10 apresenta a estrutura implementada.

Para a ruptura do fusível, a corrente medida deve ser maior que a mínima corrente inserida no arquivo .txt. Além disso, foi utilizada uma chave seletora para desativar o fusível implementado, para que fosse possível simular falhas de atuação deste dispositivo. Ressalta-se que os dados das curvas foram obtidos de S&C ELECTRIC COMPANY (2019).

Figura 10 – Estrutura de funcionamento do fusível.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.7 Considerações Finais

Este capítulo explicou como são empregados os ajustes automáticos do múltiplo de tempo e da corrente de *pick-up* do religador, baseado na localização do curto-circuito e na corrente medida pelo dispositivo. Também foi mostrado como é obtida a corrente no fusível envolvido no curto-circuito e, conseqüentemente, seu tempo de ruptura. Além disso, foi apresentado como foi realizada a modelagem de cada componente, que faz parte da proteção do SD, através de blocos pré-existentes no *software* PSCADTM/EMTDCTM e programação. Assim, no capítulo seguinte, será exposta a utilização do religador proposto com ajustes adaptativos do múltiplo de tempo e da corrente de *pick-up* nos sistemas elétricos em estudo.

4 ESTUDO DE CASOS

4.1 Considerações Iniciais

Este capítulo é voltado para os estudos relacionados ao desempenho de religadores com ajustes adaptativos da corrente de *pick-up* e do múltiplo de tempo. Portanto, o objetivo é verificar o funcionamento e os ganhos obtidos com os ajustes propostos, por meio de simulações em dois sistemas elétricos testes de distribuição. Para tanto, neste capítulo serão consideradas três situações distintas: a primeira corresponde à presença de medidores de corrente junto aos fusíveis, considerando o fluxo de potência unidirecional; a segunda refere-se à utilização de técnicas para o cálculo das correntes nos fusíveis, considerando também o fluxo de potência unidirecional; e, por fim, a terceira diz respeito ao uso de GDs e a presença de medidores de corrente junto aos fusíveis.

4.2 Especificações e Simulações

As simulações foram realizadas nos sistemas testes de distribuição de 34 barras do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) e de 134 barras do Laboratório de Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica (LaPSEE) do câmpus de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista (UNESP). Para essas simulações foram utilizados fusíveis e religadores com ajustes adaptativos da corrente de *pick-up* e do múltiplo de tempo. Para demonstrar a eficiência da proteção proposta, os resultados obtidos foram comparados com o sistema de proteção convencional.

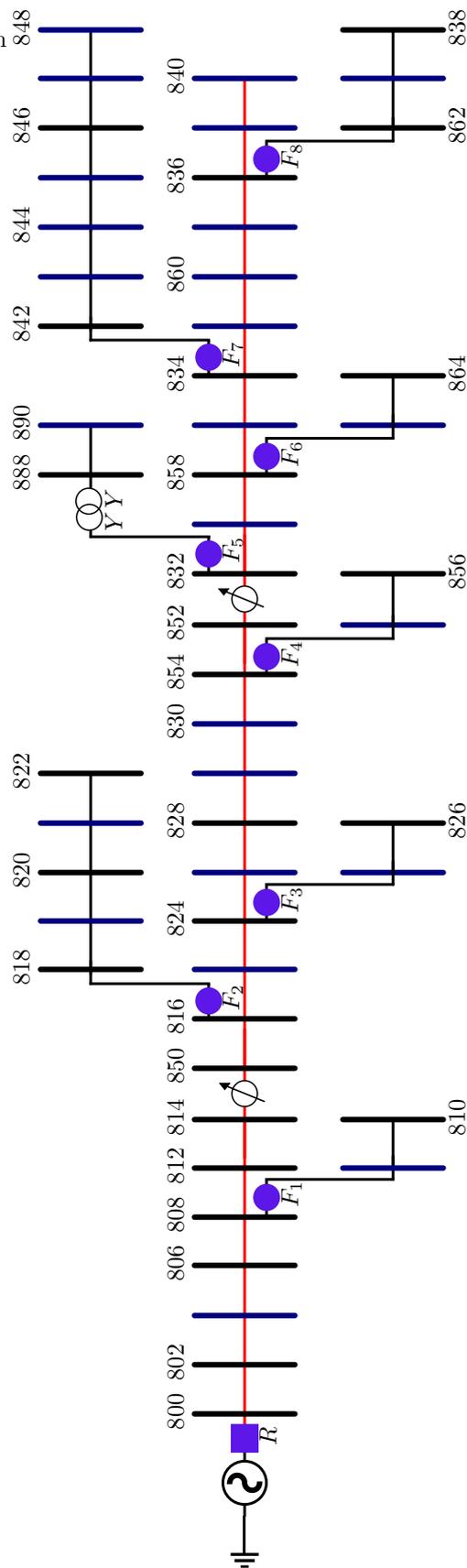
4.2.1 Caso 1

Este primeiro estudo visa aplicar o religador, com os ajustes adaptativos propostos, considerando a presença, junto aos fusíveis, de medidores que fornecerão os valores das correntes de falta. Tendo em vista que, neste caso, não foi considerada a presença de GDs e nem a mudança de carga, a corrente do sistema elétrico em estudo permaneceu a mesma, o que resultou em um valor de corrente de *pick-up* igual em todas as simulações. Diante disso, o objetivo deste primeiro estudo é verificar o funcionamento do ajuste automático do múltiplo de tempo do religador perante o local em que se encontra a falta.

O sistema teste de 34 barras, mostrado na Figura 11, foi utilizado neste caso inicial. Trata-se de um sistema desbalanceado, possuindo cargas com características de impedância, corrente e potência constante. Além disso, esse sistema possui aproximadamente 1,97 MVA de carga conectada, em sua maioria em 24,9 kV. Desse total, somente 416 kVA se encontram em 4,16 kV. Ademais, possui dois reguladores de tensão com tap fixo e um transformador, com potência nominal de 1,5 MVA e ligação em estrela aterrada em ambos os lados (24,9 kV

Figura 11 – Sistema teste de distribuição de 34 barras para o Caso 1.

obs.: barras azuis representam barras de carga. Barras sem numeração representam as cargas distribuídas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

– 4,16 kV), localizado na barra 832. Cabe destacar que o transformador da subestação não foi considerado, além do fato de que a carga e o transformador do ramal em 4,16 kV tiveram seus valores alterados (foi adotado um fator de potência de 0,84 para a carga de 416 kVA). Mais informações sobre o sistema podem ser encontradas em IEEE (2021).

Como pode ser visto na Figura 11, foram modelados oito fusíveis no *software* PSCAD™ /EMTDC™, alocados nos ramais laterais, e um religador, alocado na subestação (o ramal principal está destacado em vermelho). Os fusíveis F_1 , F_2 , F_3 , F_4 , F_5 , F_6 , F_7 e F_8 são fusíveis de 100K, 50K, 50K, 40K, 30K, 30K, 40K e 40K, respectivamente. Eles foram escolhidos com base no que foi descrito na seção 2.4. Já o religador, sem a proteção de neutro, foi ajustado conforme exposto na seção 3.3, com operações temporizadas baseadas nas curvas extremamente inversa (atuação rápida) e inversa de tempo-longo (atuação retardada) da IEC 60255-151 (IEC, 2009). O múltiplo de tempo da operação rápida foi definido como 0,05. Por outro lado, a atuação retardada tem seu múltiplo de tempo ajustado levando-se em consideração a localização da falta. Ademais, o TC selecionado possui relação de transformação de 50 e a corrente de *pick-up*, como não há variação de corrente neste cenário, foi ajustada em 1,30 A (o valor corresponde a 30% de sobrecarga). As correntes de regime permanente, medidas por cada equipamento de proteção, são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 – Correntes nos equipamentos de proteção (Caso 1)

Equipamento	Corrente (A)			Equipamento	Corrente (A)		
	Fase A	Fase B	Fase C		Fase A	Fase B	Fase C
F_1	–	1,22	–	F_6	0,14	–	–
F_2	12,96	–	–	F_7	14,96	16,28	15,28
F_3	–	3,10	–	F_8	0	2,09	0
F_4	–	0,31	–	R_1	49,52	41,75	39,01
F_5	9,68	9,63	9,64	–	–	–	–

A Tabela 2 apresenta as correntes medidas pelo fusível e pelo religador, para uma falta no ramal do fusível protetor. Tais correntes correspondem ao valor máximo obtido por meio de uma falta franca, próxima ao fusível, e ao valor mínimo medido quando um curto-circuito de 40Ω é aplicado na extremidade do ramal lateral. Como pode ser visto, na maioria dos casos, os fusíveis não respeitam a Equação 2.2. Se tal equação fosse considerada nestas situações, não haveria uma coordenação correta entre o fusível e a curva de atuação rápida do religador com múltiplo de tempo igual a 0,05, considerando que o ITC de 200 ms não seria respeitado. Deste modo, preferiu-se aumentar a corrente nominal do fusível, objetivando a coordenação, mesmo que em alguns casos (F_5) o fusível não fosse sensibilizado para faltas de 40Ω . Ressalta-se que nestas situações, nem mesmo o religador foi sensibilizado.

Curto-circuitos trifásicos, trifásicos para o terra, bifásicos, bifásicos para o terra

Tabela 2 – Mínimas e máximas correntes de curto-circuito medidas pelo fusível e pelo religador (em ampere)

Fusível protetor	Corrente medida pelo fusível		Corrente medida pelo religador	
	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima
F_1	907,31	276,92	927,82	316,89
F_2	355,74	134,94	397,85	176,96
F_3	330,86	184,39	356,78	221,90
F_4	218,83	141,25	248,34	179,52
F_5	210,00	17,30	255,40	50,47
F_6	179,28	124,93	233,91	183,63
F_7	253,56	125,53	295,90	178,61
F_8	246,54	123,30	289,35	164,95

e monofásicos foram aplicados, quando possível, em todo o alimentador em análise, totalizando 33 locais de faltas. A resistência de curto-circuito foi definida em $0,01 \Omega$, 5Ω , 20Ω e 40Ω . Assim, 1.132 curtos-circuitos foram aplicados neste primeiro caso em estudo.

A Tabela 3 apresenta uma análise estatística dos tempos de operação do religador adaptativo, em função da curva de atuação retardada, para cada tipo de falta, bem como do valor da resistência simulada. Em geral, verifica-se que nas colunas do primeiro quartil, mediana e terceiro quartil, o maior tempo de operação obtido foi de 2,4363s, 3,7747s e 7,2134s, respectivamente. Analisando todas as simulações em conjunto, 95% dos curtos-circuitos foram sanados com tempo de operação inferior a 6,9011s. Por fim, verifica-se que em alguns casos o tempo médio de atuação para faltas de 40Ω ficou abaixo do tempo médio para curtos-circuitos de 20Ω . Isso se justifica pela não sensibilização do religador ou pela presença de tempos superiores a 100s, que não foram considerados na análise estatística.

Tabela 3 – Avaliação estatística dos tempos de atuação retardada do religador para o Caso 1, considerando a proteção adaptativa

Tipo de falta	Resistência de falta (Ω)	Tempo de operação (s)						
		Mín.	Primeiro quartil	Mediana	Terceiro quartil	Máx.	Média	Desvio padrão
AG	0,01	0,0961	1,2389	2,3220	2,5066	4,7333	1,9991	1,0541
	5	0,2211	1,3561	2,4687	2,6258	16,2014	2,7866	2,9982
	20	0,6200	1,7521	2,8335	5,3881	67,1694	5,4301	12,2623
	40	1,1752	2,3882	3,3665	5,6134	20,9792	4,5517	4,1413
BG	0,01	0,0972	1,1962	2,2912	2,6091	3,0915	1,8721	0,8743
	5	0,2204	1,3204	2,5174	2,7868	28,5650	3,1802	5,2095
	20	0,6246	1,8114	2,9498	3,1833	6,5701	2,5646	1,1737

continua ...

... continuação

Tipo de falta	Resistência de falta (Ω)	Tempo de operação (s)						Média	Desvio padrão
		Mín.	Primeiro quartil	Mediana	Terceiro quartil	Máx.			
BG	40	1,1966	2,4363	3,7747	7,2134	23,3011	4,8758	4,3188	
CG	0,01	0,0961	1,2089	2,4173	2,6499	3,1432	1,9055	0,9200	
	5	0,2205	1,3278	2,5734	2,8277	40,1569	3,8952	7,8437	
	20	0,6296	1,7382	2,9888	3,2302	3,3019	2,4195	0,9335	
	40	1,2076	2,3713	3,6319	3,9545	7,8644	3,9043	2,2527	
AB	0,01	0,0925	0,9992	1,8625	2,0341	69,3125	4,1870	13,5840	
	5	0,1668	1,0794	1,9500	2,1115	11,0346	2,2682	2,7015	
	20	0,3958	1,3367	2,2208	2,3475	47,4826	4,5157	10,1244	
	40	0,7138	1,6532	2,4824	2,6408	2,6933	2,0817	0,6701	
BC	0,01	0,0925	0,9992	1,9707	2,1848	61,9969	3,9769	12,1093	
	5	0,1648	1,0718	2,0625	2,2725	15,0290	2,5889	3,5146	
	20	0,3959	1,3242	2,3456	2,5199	55,6146	4,0984	10,9974	
	40	0,7178	1,6772	2,6937	2,8922	2,9531	2,2290	0,7714	
CA	0,01	0,0925	1,0209	2,0036	2,2093	59,3994	3,8954	11,5870	
	5	0,1645	1,0946	2,0928	2,2903	13,6428	2,4937	3,1406	
	20	0,3926	1,3405	2,3701	2,5275	53,7937	4,8191	11,1476	
	40	0,7046	1,6795	2,6304	2,8153	2,8728	2,1853	0,7439	
ABG	0,01	0,0903	0,9099	1,7714	1,9615	59,5851	3,7369	11,6535	
	5	0,2139	1,0277	1,9102	2,0709	16,7367	2,1275	3,1770	
	20	0,6169	1,4315	2,3384	3,1012	72,1396	5,3338	14,3015	
	40	1,1835	2,0086	2,8946	3,1216	6,1875	3,1561	1,7094	
BCG	0,01	0,0903	0,9170	1,7982	1,9905	51,1340	3,4162	9,9636	
	5	0,2140	1,0315	1,9365	2,0993	24,7492	2,4780	4,7884	
	20	0,6186	1,4321	2,3407	2,5179	5,0375	2,0357	0,9346	
	40	1,1964	2,0292	2,9413	3,1792	6,3053	3,2091	1,7456	
CAG	0,01	0,0903	0,9151	1,7081	1,8750	36,8934	2,7835	7,1328	
	5	0,2155	1,0326	1,8308	1,9673	12,8819	1,9157	2,4108	
	20	0,6135	1,4312	2,1983	2,3457	59,2640	4,5796	11,7118	
	40	1,1666	1,9619	2,6637	2,8449	5,6283	2,9302	1,5175	
ABC	0,01	0,0897	0,8758	1,6315	1,7883	11,1849	1,6935	2,0612	
	5	0,1301	0,9158	1,6741	1,8071	3,6680	1,4025	0,7458	
	20	0,2606	1,0601	1,8282	1,9574	17,0587	2,3957	3,5330	
	40	0,4376	1,2534	2,0165	2,1298	43,9892	4,2324	9,5026	
ABCG	0,01	0,0899	0,8789	1,6493	1,8095	11,2594	1,7120	2,0752	

continua ...

... continuação

Tipo de falta	Resistência de falta (Ω)	Tempo de operação (s)						Desvio padrão
		Mín.	Primeiro quartil	Mediana	Terceiro quartil	Máx.	Média	
ABCG	5	0,2171	1,0097	1,7858	1,9182	13,2836	1,9011	2,4924
	20	0,6169	1,4491	2,1929	2,3131	62,8706	4,3559	12,4768
	40	1,1717	2,0222	2,7077	2,8722	5,7199	2,7487	1,2926

Comparando a Tabela 3 com a Tabela 4, que considera a operação retardada do religador convencional com múltiplo de tempo fixo em 0,75, é possível verificar o desempenho do religador adaptativo em relação ao convencional. Nota-se que já no primeiro quartil, o maior tempo de operação obtido passou de 2,4363s para 34,4815s (um aumento de mais de quatorze vezes). Quando analisada a coluna que corresponde a 75% dos casos (terceiro quartil), há um salto de quase oito vezes no maior tempo de atuação obtido, considerando que, com o religador adaptativo, o tempo máximo encontrado nesta coluna foi de 7,2134s e, com o convencional, o mínimo foi de 25,7503s. Também comparando a média, constata-se uma diferença significativa obtida. Por fim, analisando todas as simulações em conjunto, do religador convencional, observa-se que 95% dos casos tiveram um tempo de atuação de até 48,0673s e que somente 7% dos casos tiveram um tempo de operação inferior a 6,9438s (tempo que foi obtido em 95% das faltas considerando o religador adaptativo).

Tabela 4 – Avaliação estatística dos tempos de atuação retardada do religador para o Caso 1, considerando a proteção convencional

Tipo de falta	Resistência de falta (Ω)	Tempo de operação (s)						Desvio padrão
		Mín.	Primeiro quartil	Mediana	Terceiro quartil	Máx.	Média	
AG	0,01	0,4358	17,5417	33,2420	35,8999	41,9219	26,5818	11,9612
	5	2,2986	19,1713	34,9242	37,4517	38,4917	27,7631	11,7946
	20	8,2876	25,0883	40,2537	43,0505	43,9108	33,4257	11,6590
	40	16,6080	33,7743	47,8803	50,7214	52,3317	41,5486	11,4395
BG	0,01	0,4368	16,9130	33,3219	38,0757	45,2735	26,7889	13,4121
	5	2,3020	18,6943	34,0991	39,9565	41,9959	28,0709	13,3072
	20	8,3632	24,8027	40,9698	46,6751	48,7627	34,5329	13,6377
	40	16,9324	34,0415	51,1639	56,4591	58,6139	44,0464	14,0915
CG	0,01	0,4357	17,0791	35,2079	38,6856	46,0927	27,5314	13,7862
	5	2,3042	18,8639	37,2314	40,5666	41,6384	28,7011	13,6489

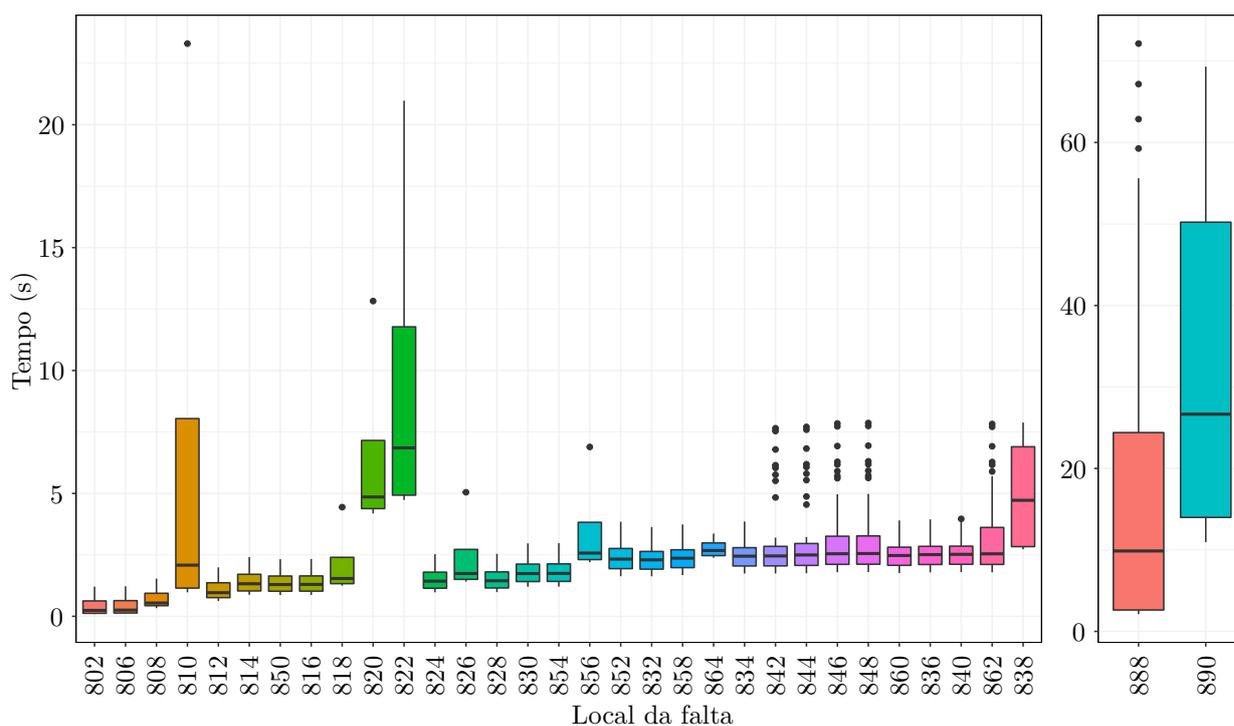
continua ...

... continuação

Tipo de falta	Resistência de falta (Ω)	Tempo de operação (s)						
		Mín.	Primeiro quartil	Mediana	Terceiro quartil	Máx.	Média	Desvio padrão
CG	20	8,3953	25,0306	43,7693	47,3427	48,4531	35,2256	13,9830
	40	17,0545	34,4815	53,4216	57,3210	58,4852	44,9340	14,4549
AB	0,01	0,3817	13,9436	26,8458	29,4480	94,4879	23,9901	17,7229
	5	1,4641	15,0506	27,9848	30,2357	82,2434	24,1249	15,7565
	20	4,9133	18,5694	31,2966	33,6314	34,3566	25,1633	10,0102
	40	9,6927	23,7402	36,1470	38,5684	39,3022	30,1684	10,0349
BC	0,01	0,3817	13,9115	28,4563	31,2957	37,7809	22,3452	11,1315
	5	1,4631	15,0436	29,8234	32,6113	96,5213	25,9779	18,4669
	20	4,9299	18,7395	33,7494	36,5249	37,3881	26,8195	11,2324
	40	9,7603	24,0946	39,3496	42,2923	43,1877	32,3754	11,5641
CA	0,01	0,3817	14,2521	28,9599	31,6688	38,9475	22,6870	11,3082
	5	1,4594	15,3756	30,1978	32,8423	86,3583	25,7820	16,8244
	20	4,8777	18,9270	33,5644	36,2510	37,0898	26,7441	11,0907
	40	9,5559	24,1573	38,3977	41,1839	42,0306	31,7241	11,1380
ABG	0,01	0,3479	12,6163	25,5164	28,3704	99,1799	23,2623	18,6133
	5	2,2025	14,3679	27,4329	29,8160	30,5703	21,3361	9,8010
	20	8,2525	20,3066	33,5276	36,0841	36,8614	27,4891	9,9720
	40	16,6844	29,0930	42,3186	45,0929	45,9021	36,4123	10,1929
BCG	0,01	0,3479	12,6558	25,8774	28,4217	35,9854	20,3626	10,2225
	5	2,2043	14,4225	27,8202	30,2650	31,0340	21,5992	9,9905
	20	8,2799	20,4202	34,0305	36,6639	37,4603	27,8546	10,2018
	40	16,9282	29,3946	43,0561	45,9824	46,7782	37,0173	10,4693
CAG	0,01	0,3479	12,6888	24,5728	27,0595	92,1175	22,3001	17,2154
	5	2,2003	14,4113	26,2499	28,3052	28,9500	20,5272	9,1311
	20	8,1807	20,1813	31,4981	33,6349	34,2792	26,0717	8,9431
	40	16,4932	28,3620	38,8658	41,2567	41,7291	33,9188	8,6285
ABC	0,01	0,3397	12,0737	23,4250	25,7503	83,3696	21,0252	15,6392
	5	0,9505	12,7052	24,0562	26,0618	53,9627	19,9917	11,1715
	20	2,9032	14,6399	25,8502	27,8409	28,4660	20,4511	8,7023
	40	5,5516	17,3988	28,4177	30,4562	31,0826	23,1181	8,6829
ABCG	0,01	0,3418	12,1308	23,6947	26,1073	83,9291	21,2757	15,7745
	5	2,2502	14,0725	25,5689	27,5643	28,1918	20,0381	8,8424
	20	8,2440	20,4228	31,4147	33,5012	34,1292	26,1234	8,7891
	40	16,5648	29,2741	39,5630	42,0086	42,3898	34,6499	8,6966

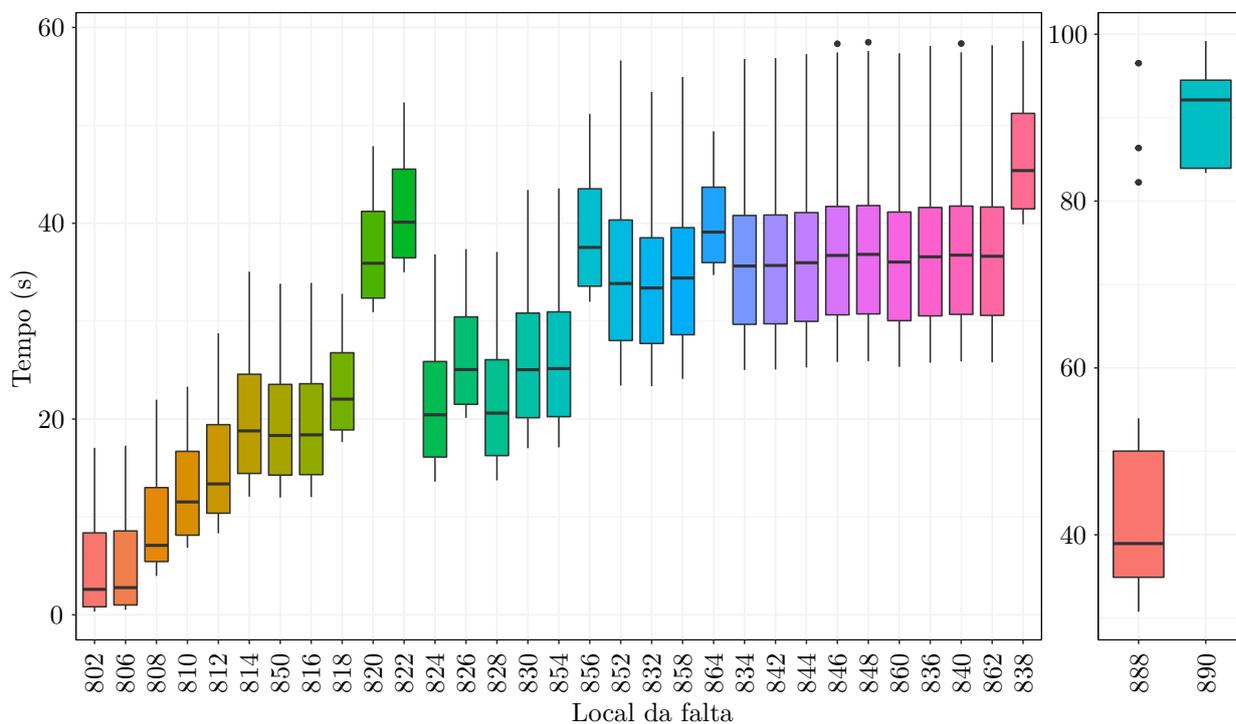
As Figuras 12 e 13 mostram a distribuição dos tempos de atuação do religador adaptativo e convencional, respectivamente, em relação aos locais das faltas. Considerando o religador convencional, pode-se observar que à medida que a distância do curto-circuito aumenta, em relação ao dispositivo, o tempo de operação também tende a aumentar significativamente. O mesmo não é visto quando se considera o religador adaptativo, com os maiores aumentos observados apenas nas barras protegidas por fusíveis (barras 810, 818, 820, 822, 826, 856, 888, 890, 864, 842, 844, 846, 848, 862 e 838). Analisando os tempos de atuação devido às faltas nas barras 888 e 890, mesmo com um tempo de operação considerável, é possível notar uma redução nos valores encontrados devido ao ajuste automático proposto. Por fim, deve-se notar que a maioria dos locais de curto-circuito apresentados são protegidos unicamente pelo religador, ou seja, uma redução no tempo de continuidade da falta permanente é altamente desejada.

Figura 12 – Boxplots dos tempos de atuação retardada do religador para o Caso 1, considerando a proteção adaptativa.



A Tabela 5 apresenta o ITC obtido entre a curva retardada do religador (adaptativo e convencional) e o tempo máximo de ruptura do fusível protetor. Ao comparar os intervalos considerando a proteção adaptativa em relação à convencional, é possível verificar que o ITC está mais próximo do valor mínimo estipulado (200 ms) na proteção adaptativa. Isso resulta em tempos de continuidade mais curtos para uma falta permanente em caso de falha de operação do fusível. Além disso, pode-se observar que somente para uma falta de $40\ \Omega$ na barra 810, o mesmo valor do ITC foi obtido para ambos os casos (já que o valor do múltiplo de tempo obtido para o religador adaptativo foi igual ao ajustado para o religador

Figura 13 – Boxplots dos tempos de atuação retardada do religador para o Caso 1, considerando a proteção convencional.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5 – ITC, em segundos, entre a curva retardada do religador e o tempo máximo de ruptura do fusível (Caso 1)

Local da falta	Proteção adaptativa				Proteção convencional			
	Resistência de falta (Ω)				Resistência de falta (Ω)			
	0,01	5	20	40	0,01	5	20	40
810	0,5812	0,5952	0,7918	1,6285	6,4587	7,9520	12,3332	1,6285
818	0,6101	0,5951	0,4329	1,9411	17,0155	18,5387	23,4778	30,2915
820	2,1164	2,0268	1,2211	2,5222	28,8399	30,4192	34,9500	37,5764
822	1,9080	1,6740	2,6184	1,8435	32,1636	33,6418	37,1658	33,1959
826	0,6733	0,6464	0,4215	1,8767	19,3880	21,0839	26,6034	34,1926
856	1,1364	1,1127	0,9022	3,5526	30,9191	32,8694	39,0697	47,8262
888	1,6151*	2,2463*	-	-	36,4153*	72,2093*	-	-
890	4,7417*	-	-	-	57,2325*	-	-	-
864	1,4327	1,4497	1,4387	1,2133	33,7595	35,3609	40,3622	47,2426
842	0,8751*	0,8274*	1,0569*	1,7258*	33,7595*	35,3609*	40,3622*	47,2426*
844	0,8684*	0,8205*	1,2484*	1,7013*	29,1514*	30,6072*	35,1048*	41,2168*
846	0,8544*	0,7984*	1,2152*	1,8934*	29,3944*	30,8534*	35,3517*	41,4542*
848	0,8514*	0,7935*	1,2099*	1,8847*	30,0571*	31,5131*	35,9996*	42,0678*
862	0,8684*	0,7985*	1,3634*	1,5276*	30,1531*	31,6076*	36,0934*	42,1571*
838	0,9051	0,7929	3,5167	2,6298	30,0068	31,4468	35,8539	41,6346

Nota: - não sensibilizado; * valor médio

convencional). Os outros casos foram todos, em média, vinte e sete vezes menores. Por fim, vale ressaltar que os ITCs apresentados são os valores reais obtidos, sendo exposto apenas o valor médio nos casos das faltas nas barras 888, 890, 842, 844, 846, 848 e 862.

A Tabela 6 apresenta uma análise estatística dos múltiplos de tempo obtidos para os curtos-circuitos aplicados envolvendo fusíveis. Observe que a coluna da mediana, independentemente do tipo de falta, possui o menor múltiplo de tempo (0,05). Ao considerar a coluna do terceiro quartil, as faltas AG, BG, ABG, BCG e CAG obtêm um múltiplo de tempo de até 0,10. Isso mostra que um múltiplo de tempo de 0,10 seria suficiente para coordenar 75% dos casos, para cada tipo de falta. Por fim, deve-se notar que múltiplos de tempo maiores que 0,75 (valor adotado no religador com ajuste fixo) foram obtidos somente quando o tempo de ruptura do fusível é maior que 100 s (ressalta-se que estes casos não foram considerados durante o ajuste do múltiplo de tempo do religador convencional).

Tabela 6 – Avaliação estatística do múltiplo de tempo, obtido pelo ajuste adaptativo, para faltas envolvendo religador e fusível (Caso 1)

Tipo de falta	Múltiplo de tempo				
	Mínimo	Primeiro quartil	Mediana	Terceiro quartil	Máximo
AG	0,05	0,05	0,05	0,10	1,80
BG	0,05	0,05	0,05	0,10	1,30
CG	0,05	0,05	0,05	0,05	1,15
AB	0,05	0,05	0,05	0,05	0,55
BC	0,05	0,05	0,05	0,05	0,40
CA	0,05	0,05	0,05	0,05	0,35
ABG	0,05	0,05	0,05	0,10	1,70
BCG	0,05	0,05	0,05	0,10	1,55
CAG	0,05	0,05	0,05	0,10	2,15
ABC	0,05	0,05	0,05	0,05	2,05
ABCG	0,05	0,05	0,05	0,05	2,05

Diante dos resultados apresentados até o momento, percebe-se que a diferença no tempo de operação retardada torna-se mais expressiva nos casos em que o religador é o dispositivo primário de proteção. Por outro lado, em situações de falta com maior resistência e com envolvimento de fusíveis, o tempo de atuação do religador adaptativo tende a se aproximar do tempo de atuação do religador convencional. Este fato se deve às características do ajuste do múltiplo de tempo implementado, o qual, dependendo da presença ou ausência de um dispositivo de proteção a jusante do religador, gera um determinado valor de ajuste. Assim, na ausência de outro dispositivo de proteção a jusante, o múltiplo de tempo é ajustado para o valor mínimo. Quando há presença, o ajuste é condicionado ao tempo do fusível a jusante, que é calculado em função da corrente de falta. Por fim, os tempos de operação do religador, devido à curva rápida de atuação, e dos fusíveis estão disponíveis no Apêndice A.

4.2.2 Caso 2

Este caso visa observar o funcionamento do religador adaptativo proposto ao utilizar transmissores de falta junto aos fusíveis. Ressalta-se que, neste estudo, a corrente que passa pelo fusível no momento do curto-circuito é calculada pelo religador, conforme mencionado na subseção 3.3.1. Além disso, como não foi considerada a presença de GDs, a corrente do sistema elétrico permaneceu a mesma, o que resultou em um valor fixo de corrente de *pick-up*. Portanto, o objetivo deste caso é verificar o funcionamento do ajuste automático do múltiplo de tempo do religador diante de erros nos dados fornecidos de corrente do fusível.

Este estudo utilizou o mesmo sistema teste apresentado na subseção 4.2.1, com exceção da adição do transformador da subestação, com potência de 2,5 MVA (69 kV – 24,9 kV) e tap de 1,05, e do ajuste das cargas para a característica de impedância constante. Além disso, foram modelados dois religadores, com ajuste automático do múltiplo de tempo e com esquema de bloqueio/transferência de *trip*, e nove fusíveis do tipo T. Um dos religadores foi alocado na subestação e o outro entre as barras 824 e 828. Os fusíveis foram alocados nos ramais laterais conforme representado na Figura 14. A localização e os valores dos ajustes da proteção foram obtidos utilizando um algoritmo genético de classificação por não dominância (do inglês *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA-II)). Para isso, foi considerado o modelo de otimização proposto em Faria *et al.* (2020), que visa minimizar os custos dos equipamentos, o índice de duração média de interrupção do sistema e os custos esperados com energia não atendida.

Os fusíveis $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7, F_8$ e F_9 possuem as respectivas correntes nominais: 40T, 20T, 12T, 15T, 12T, 10T, 15T, 10T e 12T. Já os religadores localizados na subestação (denominado R_1 neste estudo) e entre as barras 824 e 828 (denominado R_2 neste estudo), possuem os ajustes de curva e de corrente de *pick-up* conforme Tabela 7. Salienta-se que as curvas são baseadas na norma IEEE C37.112 (IEEE, 2019).

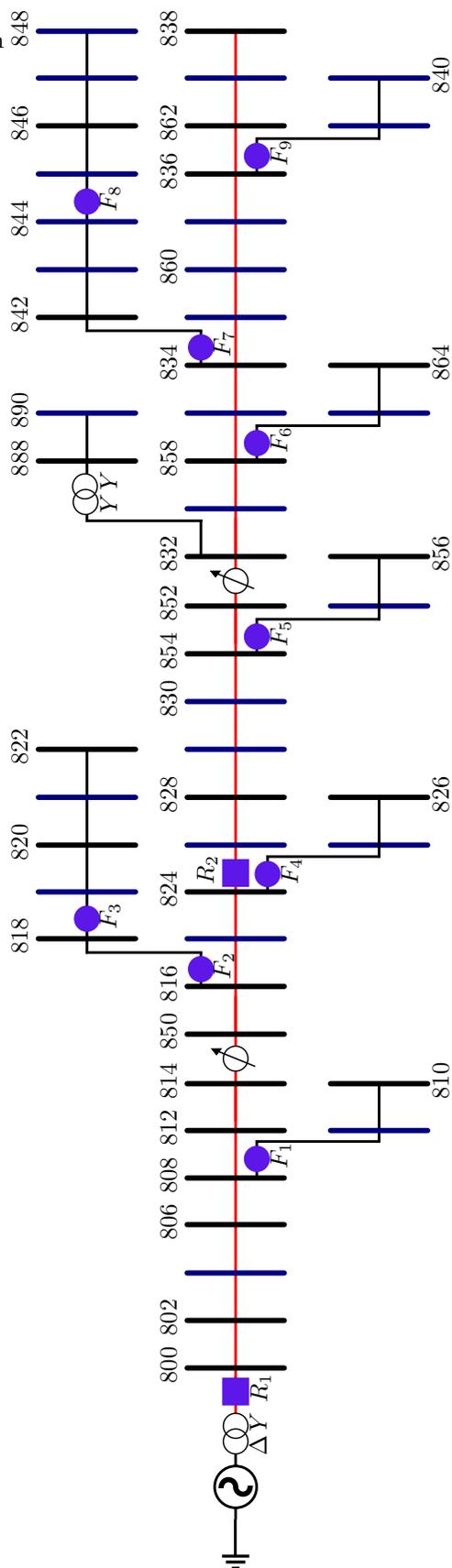
Tabela 7 – Dados dos religadores alocados no Caso 2

	50		50N		51			51N		
	I_p^r (A)	MT	I_p^r (A)	MT	I_p^r (A)	Curva de operação	MT	I_p^r (A)	Curva de operação	MT
R_1	54	2,0	17	2,0	56	Moderadamente inverso	8,5	63	Moderadamente inverso	2,0
R_2	39	1,0	7	1,0	39	Moderadamente inverso	1,5	26	Extremamente inverso	1,5

Diante disso, foram consideradas operações instantâneas (50 e 50N) durante a atuação rápida dos religadores (ou seja, um tempo de operação de $0,05 \times \text{MT}$ para correntes maiores que I_p^r). Já a atuação retardada dos religadores foi baseada nas operações temporizadas (51 e 51N). Ressalta-se que o múltiplo de tempo da atuação retardada foi

Figura 14 – Sistema teste de distribuição de 34 barras para o Caso 2.

obs.: barras azuis representam barras de carga. Barras sem numeração representam as cargas distribuídas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

definido automaticamente pelo religador, sendo os apresentados na tabela, utilizados no ajuste do religador convencional. Além disso, as correntes de *pick-up* tiveram seu valor fixo (pois não há variação de corrente neste estudo) considerando uma sobrecarga de 10% e 4% para R_1 e R_2 , respectivamente, conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Correntes nos equipamentos de proteção (Caso 2)

Equipamento	Corrente (A)			Equipamento	Corrente (A)		
	Fase A	Fase B	Fase C		Fase A	Fase B	Fase C
F_1	–	1,25	–	F_7	14,17	15,94	14,85
F_2	12,64	–	–	F_8	9,32	9,06	9,11
F_3	12,64	–	–	F_9	1,49	2,33	1,77
F_4	–	3,07	–	R_1	51,04	44,19	40,76
F_5	–	0,30	–	R_2	35,23	36,33	37,55
F_6	0,15	–	–	–	–	–	–

Antes de serem apresentados os tempos de atuação dos dispositivos de proteção, serão mostradas as diferenças entre as estimativas das correntes que fluem pelos fusíveis envolvidos no curto-circuito e as correntes medidas por eles. Conforme já explicado, a corrente estimada é calculada com base nas medições de tensão e de corrente realizadas pelo religador mais próximo e a montante do ponto de falta, quando uma *flag* é enviada pelo transmissor de falta ao religador. Portanto, a Tabela 9 apresenta as diferenças obtidas. Observa-se que o erro encontrado é desprezível, sendo a maior diferença (4,43 A) devido a um curto-circuito BC de $40\ \Omega$ na barra 840. Assim, espera-se que o tempo de ruptura do fusível calculado pelo religador seja muito próximo ao tempo real.

Tabela 9 – Diferença, em módulo, entre a corrente de curto-circuito mediada pelo fusível e a corrente estimada pelo religador

Tipo de falta	Resistência de falta (Ω)	Diferença de corrente em função do local da falta (A)											
		810	818	820	822	826	856	864	842	844	846	848	840
AG	0,01	–	0,24	0,31	0,33	–	–	0,17	0,21	0,22	0,27	0,28	0,80
	5	–	0,23	0,32	0,34	–	–	0,28	0,30	0,30	0,30	0,30	0,63
	20	–	0,27	0,35	0,38	–	–	0,30	0,31	0,31	0,31	0,31	0,68
	40	–	0,33	0,41	0,42	–	–	0,32	0,33	0,33	0,33	0,33	0,72
BG	0,01	0,20	–	–	–	0,22	0,28	–	0,24	0,24	0,24	0,25	0,64
	5	0,25	–	–	–	0,24	0,30	–	0,26	0,26	0,26	0,26	0,73
	20	0,35	–	–	–	0,31	0,34	–	0,30	0,30	0,30	0,30	0,98
	40	0,41	–	–	–	0,37	0,38	–	0,34	0,34	0,34	0,34	1,20
CG	0,01	–	–	–	–	–	–	–	0,21	0,22	0,26	0,26	0,73
	5	–	–	–	–	–	–	–	0,28	0,28	0,28	0,28	0,61

continua ...

... continuação

Tipo de falta	Resistência de falta (Ω)	Diferença de corrente em função do local da falta (A)												
		810	818	820	822	826	856	864	842	844	846	848	840	
CG	20	–	–	–	–	–	–	–	0,30	0,30	0,30	0,30	0,66	
	40	–	–	–	–	–	–	–	0,32	0,32	0,33	0,33	0,68	
ABG	0,01	–	–	–	–	–	–	–	0,04*	0,06*	0,08*	0,09*	0,22*	
	5	–	–	–	–	–	–	–	0,11*	0,11*	0,12*	0,12*	0,23*	
	20	–	–	–	–	–	–	–	0,16*	0,16*	0,17*	0,17*	0,48*	
	40	–	–	–	–	–	–	–	0,22*	0,22*	0,22*	0,22*	0,70*	
BCG	0,01	–	–	–	–	–	–	–	0,12*	0,09*	0,09*	0,09*	0,20*	
	5	–	–	–	–	–	–	–	0,11*	0,11*	0,12*	0,12*	0,23*	
	20	–	–	–	–	–	–	–	0,18*	0,18*	0,18*	0,18*	0,45*	
	40	–	–	–	–	–	–	–	0,24*	0,24*	0,24*	0,24*	0,64*	
CAG	0,01	–	–	–	–	–	–	–	0,05*	0,07*	0,08*	0,09*	0,35*	
	5	–	–	–	–	–	–	–	0,13*	0,13*	0,13*	0,13*	0,18*	
	20	–	–	–	–	–	–	–	0,15*	0,15*	0,16*	0,16*	0,32*	
	40	–	–	–	–	–	–	–	0,20*	0,20*	0,21*	0,21*	0,42*	
ABCG	0,01	–	–	–	–	–	–	–	0,08*	0,07*	0,01*	0,02*	0,13*	
	5	–	–	–	–	–	–	–	0,05*	0,05*	0,06*	0,06*	0,06*	
	20	–	–	–	–	–	–	–	0,10*	0,10*	0,11*	0,11*	0,28*	
	40	–	–	–	–	–	–	–	0,16*	0,17*	0,17*	0,17*	0,47*	
AB	0,01	–	–	–	–	–	–	–	0,10*	0,09*	0,09*	0,09*	4,21*	
	5	–	–	–	–	–	–	–	0,09*	0,09*	0,09*	0,09*	4,22*	
	20	–	–	–	–	–	–	–	0,07*	0,07*	0,07*	0,07*	4,24*	
	40	–	–	–	–	–	–	–	0,09*	0,09*	0,10*	0,10*	4,24*	
BC	0,01	–	–	–	–	–	–	–	0,09*	0,09*	0,09*	0,09*	4,02*	
	5	–	–	–	–	–	–	–	0,08*	0,08*	0,08*	0,08*	4,08*	
	20	–	–	–	–	–	–	–	0,07*	0,07*	0,08*	0,08*	4,25*	
	40	–	–	–	–	–	–	–	0,11*	0,11*	0,12*	0,12*	4,43*	
CA	0,01	–	–	–	–	–	–	–	0,11*	0,09*	0,09*	0,09*	3,86*	
	5	–	–	–	–	–	–	–	0,08*	0,08*	0,08*	0,08*	3,91*	
	20	–	–	–	–	–	–	–	0,07*	0,07*	0,08*	0,08*	4,04*	
	40	–	–	–	–	–	–	–	0,09*	0,09*	0,10*	0,10*	4,16*	
ABC	0,01	–	–	–	–	–	–	–	0,08*	0,06*	0,01*	0,02*	0,33*	
	5	–	–	–	–	–	–	–	0,02*	0,03*	0,04*	0,05*	0,33*	
	20	–	–	–	–	–	–	–	0,06*	0,06*	0,07*	0,07*	0,36*	
	40	–	–	–	–	–	–	–	0,08*	0,08*	0,09*	0,09*	0,41*	

Nota: * valor médio

A Tabela 10 apresenta uma análise estatística dos tempos de operação dos religadores adaptativos, considerando a atuação retardada, para cada tipo de falta. Pode-se observar que, independentemente do tipo de falta, 25% (primeiro quartil) dos tempos de operação do R_1 ficaram abaixo do tempo de atuação instantânea (100 ms). Para faltas do tipo ABC, a porcentagem dos casos sobe para 75%. Considerando todos os tempos de operação do R_1 em conjunto, 95% dos curtos-circuitos foram sanados em até 0,31 s. Quanto ao R_2 , é possível observar que algumas faltas foram eliminadas no menor tempo permitido (50 ms), sendo que o maior tempo de operação foi de 1,9757 s. Além disso, 95% dos curtos-circuitos foram sanados em até 1,4226 s.

Tabela 10 – Avaliação estatística dos tempos de atuação retardada dos religadores R_1 e R_2 para o Caso 2, considerando a proteção adaptativa

Tipo de falta	Tempo de operação (s)						
	Mín.	Primeiro quartil	Mediana	Terceiro quartil	Máx.	Média	Desvio padrão
R_1							
AG	0,0558	0,0952	0,1157	0,1320	2,7404	0,3080	0,5541
BG	0,0558	0,0948	0,1170	0,1278	3,0995	0,2243	0,4363
CG	0,0558	0,0897	0,1157	0,1274	5,3894	0,1653	0,5268
AB	0,0581	0,0818	0,1001	0,1065	1,0748	0,1201	0,1386
BC	0,0582	0,0846	0,1042	0,1127	23,3667	0,3929	2,3498
CA	0,0582	0,0851	0,1054	0,1142	1,2330	0,1299	0,1589
ABG	0,0558	0,0826	0,1008	0,1109	2,5514	0,1561	0,3254
BCG	0,0558	0,0835	0,1046	0,1149	3,1587	0,1526	0,3582
CAG	0,0558	0,0839	0,1017	0,1105	2,1952	0,1489	0,2842
ABC	0,0558	0,0780	0,0945	0,0997	0,5178	0,1008	0,0654
ABCG	0,0558	0,0807	0,0980	0,1083	2,4977	0,1525	0,3197
R_2							
AG	0,0500	0,0553	0,0924	1,1384	1,9757	0,5310	0,6372
BG	0,0500	0,0500	0,0757	0,9947	1,7196	0,4583	0,5592
CG	0,0500	0,0512	0,0802	1,0411	1,7780	0,4663	0,5851
AB	0,0708	0,0847	0,0921	0,8456	1,4224	0,4083	0,4676
BC	0,0714	0,0857	0,0930	0,8562	1,4379	0,4215	0,4906
CA	0,0715	0,0857	0,0930	0,8559	1,4370	0,4205	0,4923
ABG	0,0500	0,0781	0,0948	0,9544	1,7362	0,4466	0,5372
BCG	0,0500	0,0699	0,0963	0,8968	1,5548	0,4076	0,4840
CAG	0,0500	0,0822	0,0976	0,8787	1,6059	0,4191	0,4930
ABC	0,0672	0,0796	0,0838	0,6744	1,0352	0,3260	0,3636
ABCG	0,0670	0,0807	0,0940	0,8016	1,4481	0,3900	0,4406

Comparando a Tabela 10 com a Tabela 11, que considera a operação retardada dos religadores com ajuste convencional, é possível verificar o desempenho dos religadores adaptativos em relação aos convencionais. Observa-se que o menor tempo de operação obtido pelo R_1 com ajuste convencional foi de 2,3373 s, que é cerca de quarenta e duas vezes maior que o menor tempo do religador R_1 com ajuste adaptativo. Ao comparar a

coluna do terceiro quartil, o tempo de operação passou de alguns décimos de segundo para mais de cinco segundos. Tal comportamento também é observado nos valores médios obtidos. Ao analisar a coluna dos tempos máximos, é possível verificar que a atuação do R_1 passou de alguns segundos para mais de quarenta segundos ao utilizar o ajuste convencional. Tais diferenças não são tão significativas quando se comparam os tempos de operação do R_2 , sendo mais expressivas quando se confrontam os tempos máximos. Por fim, analisando todas as simulações em conjunto, do religador convencional, verifica-se que 95% dos casos obtiveram tempos de atuação de até 20,5072 s e 9,3595 s, para R_1 e R_2 , respectivamente.

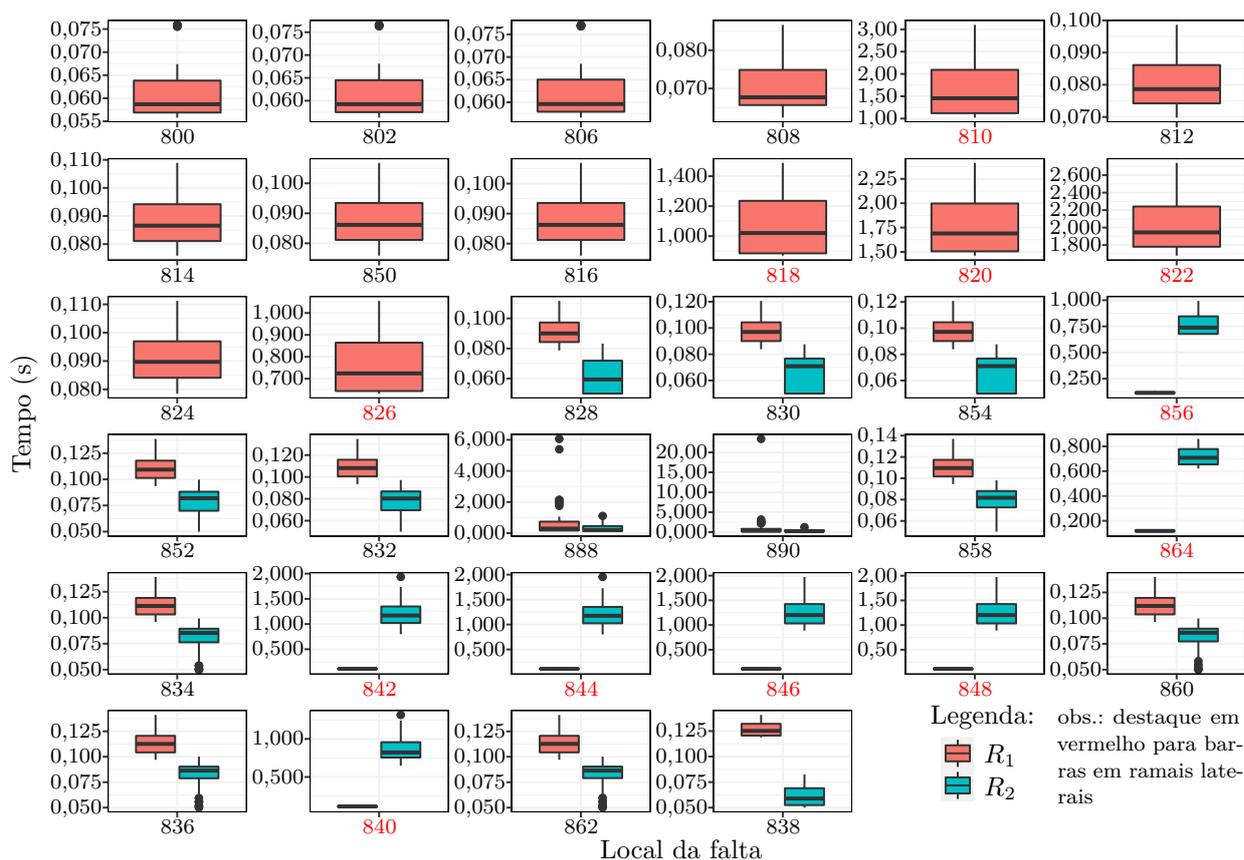
Tabela 11 – Avaliação estatística dos tempos de atuação retardada dos religadores R_1 e R_2 para o Caso 2, considerando a proteção convencional

Tipo de falta	Tempo de operação (s)						
	Mín.	Primeiro quartil	Mediana	Terceiro quartil	Máx.	Média	Desvio padrão
R_1							
AG	2,3373	4,2191	5,7698	6,6153	48,6043	6,2503	5,5226
BG	2,3545	4,1713	5,9611	6,9822	60,0769	6,7418	7,0530
CG	2,3412	4,1956	6,2502	7,4436	66,3266	7,3072	8,3093
AB	9,8828	13,8918	16,9540	18,0370	82,5102	17,4156	9,5877
BC	9,8962	14,2835	17,7044	18,8457	43,8020	17,0023	4,8985
CA	9,9004	14,4471	17,9119	19,3332	98,4801	18,6850	11,6731
ABG	2,3455	4,8223	7,4590	8,5960	49,7091	7,7692	6,4788
BCG	2,3566	4,8279	8,1559	10,1067	59,5842	8,9491	7,9160
CAG	2,3510	4,8249	7,7814	9,4076	44,6468	8,1949	6,1388
ABC	9,4941	13,2653	16,0666	16,9495	88,0217	17,1346	11,1104
ABCG	9,4942	13,5625	16,6054	18,3419	45,7472	16,5149	5,0185
R_2							
AG	0,7980	1,6236	1,8681	2,7009	36,9250	3,3639	5,8859
BG	0,7096	1,4016	1,5960	2,2494	30,3826	2,8552	4,8642
CG	0,7495	1,5280	1,7485	2,5584	24,6387	2,9282	4,1984
AB	2,1234	2,5400	2,6035	2,8027	20,2318	3,3888	3,0893
BC	2,1412	2,5703	2,6431	2,8180	18,0118	3,3464	2,7425
CA	2,1449	2,5717	2,6435	2,8204	16,0126	3,2770	2,4275
ABG	1,0789	2,3378	2,5422	2,8925	29,5619	3,6226	4,8055
BCG	0,9550	2,0740	2,2862	2,9393	24,4889	3,3243	4,0485
CAG	1,0669	2,4453	2,6312	2,9795	26,2209	3,6122	4,2787
ABC	2,0149	2,3892	2,4493	2,5341	10,2143	2,8256	1,4476
ABCG	2,0094	2,4053	2,5310	2,8663	26,0093	3,6221	4,2069

As Figuras 15 e 16 apresentam, respectivamente, a distribuição dos tempos de atuação dos religadores com ajuste automático e convencional do múltiplo de tempo, em relação aos locais de falta. Observando a Figura 15, é possível verificar que R_1 e R_2 só possuem tempo de operação superior a 1 s para os casos em que são a proteção de retaguarda do fusível. Ademais, verifica-se também que o tempo da operação retardada do R_2 é maior

que o tempo do R_1 nos curtos-circuitos envolvendo fusíveis. Tais comportamentos não são observados quando se utiliza o religador convencional (Figura 16), que possui tempos de operação de R_1 sempre superiores aos tempos de R_2 . Verifica-se também, no convencional, que quando R_1 é *backup* do fusível, este tem o tempo de operação menor do que nos demais casos, visto que, em razão das faltas serem monofásicas, o religador atua devido à proteção de neutro que é mais rápida do que a proteção de fase. Este fato também pode ser constatado na Tabela 11, quando se comparam os tempos obtidos quando são aplicadas faltas envolvendo o terra com faltas sem envolvimento do terra. Por fim, deve-se notar que em ambos os modelos de religadores simulados, foi necessário implementar um esquema de bloqueio/transferência de *trip*, levando em consideração que a primeira atuação do R_1 será sempre 0,1 s após sensibilizado, o que é, na maioria dos casos, menor que o tempo de operação retardada do R_2 .

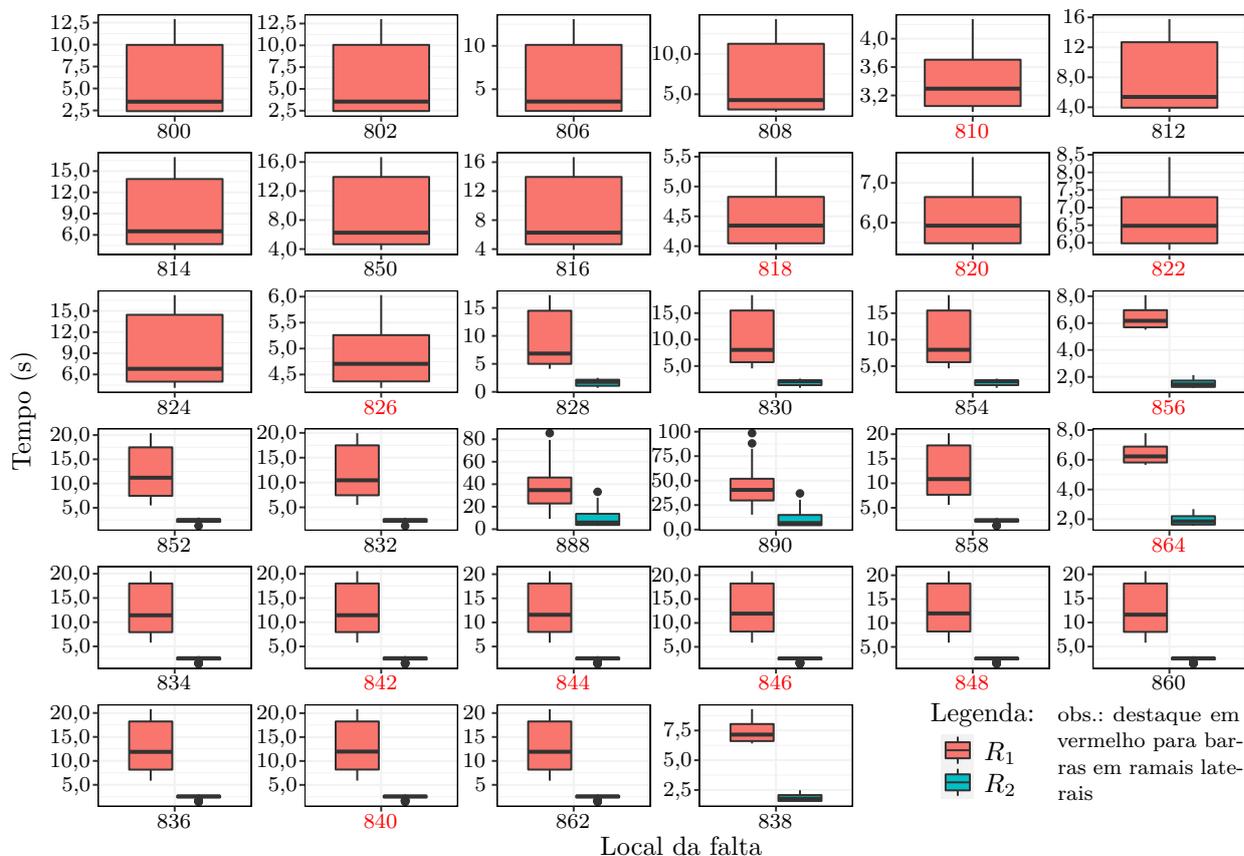
Figura 15 – Boxplots dos tempos de atuação retardada dos religadores R_1 e R_2 para o Caso 2, considerando a proteção adaptativa.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 12 mostra os ITCs obtidos entre a curva retardada do religador (adaptativo e convencional) e o tempo máximo de ruptura do fusível a jusante envolvido na falta (observa-se que em ramais laterais com dois fusíveis em série, o religador sempre coordenará com o fusível mais próximo a ele, conforme explicado). Ao comparar os intervalos obtidos considerando a proteção adaptativa em relação à convencional, é possível observar que o

Figura 16 – Boxplots dos tempos de atuação retardada dos religadores R_1 e R_2 para o Caso 2, considerando a proteção convencional.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 12 – ITC, em segundos, entre a curva retardada do religador e o tempo máximo de ruptura do fusível (Caso 2)

Local da falta	Proteção adaptativa				Proteção convencional			
	Resistência de falta (Ω)				Resistência de falta (Ω)			
	0,01	5	20	40	0,01	5	20	40
810	0,2030	0,2171	0,2474	0,2092	2,1497	2,1407	2,0040	1,3848
818	0,2701	0,2335	0,2846	0,2339	3,3383	3,4275	3,7386	4,2371
820	0,2634	0,2293	0,2359	0,2267	4,1173	4,2460	4,6886	5,4598
822	0,2608	0,2918	0,1861	0,2292	4,3821	4,5257	5,0283	5,9209
826	0,2245	0,2051	0,2152	0,2137	3,8359	3,9667	4,4177	5,1875
856	0,2369	0,2136	0,2122	0,2159	0,7499	0,8084	1,0088	1,3504
864	0,2222	0,2400	0,2425	0,2147	1,1548	1,2399	1,5394	2,0364
842	0,2209*	0,2412*	0,2250*	0,2470*	1,3951*	1,4201*	1,4655*	1,4945*
844	0,2137*	0,2366*	0,2268*	0,2352*	1,3989*	1,4255*	1,4674*	1,4944*
846	0,2409*	0,2396*	0,2270*	0,2393*	1,4165*	1,4355*	1,4724*	1,4930*
848	0,2405*	0,2376*	0,2253*	0,2374*	1,4192*	1,4362*	1,4732*	1,4928*
840	0,2584*	0,2445*	0,2420*	0,2485*	1,7379*	1,7760*	1,8795*	2,0025*

Nota: * valor médio

ITC do religador adaptativo está muito próximo do valor mínimo estipulado (200 ms), com o curto-circuito de $20\ \Omega$ na barra 822 obtendo tempo de 0,1861 s. Além disso, verifica-se que os intervalos obtidos pelo religador convencional, apesar de ter sido aplicado um algoritmo de coordenação visando minimizar os tempos de operação, foram em grande parte superiores a 1 s, com ITCs de até 5,9209 s. Por fim, é possível concluir que a diferença de corrente apresentada na Tabela 9 não prejudicou a coordenação entre o religador adaptativo e o fusível envolvido na falta, mesmo que alguns casos não tenham respeitado o ITC mínimo estipulado.

A Tabela 13 apresenta uma análise estatística dos múltiplos de tempo obtidos quando os curtos-circuitos são aplicados nos ramais laterais. Observe que tanto R_1 quanto R_2 tiveram seus múltiplos de tempo ajustados a partir de 0,30. Nas situações em que a proteção de neutro do R_2 não foi sensibilizada, o múltiplo de tempo permaneceu no menor valor possível (0,05). Ademais, é visto que múltiplos de tempo de 1,75 e 1,45 já seriam suficientes para coordenar, respectivamente, a proteção de fase e neutro do R_1 com os fusíveis em que é retaguarda. Também, múltiplos de tempo de 0,90 (para a proteção de fase) e 1,20 (para a proteção de neutro) proporcionaria a coordenação de R_2 com seus respectivos fusíveis.

Tabela 13 – Avaliação estatística do múltiplo de tempo, obtido pelo ajuste adaptativo, para faltas envolvendo religador e fusível (Caso 2)

Tipo de falta	Múltiplo de tempo									
	Mín.		Primeiro quartil		Mediana		Terceiro quartil		Máx.	
	51	51N	51	51N	51	51N	51	51N	51	51N
R_1										
AG	0,50	0,45	0,68	0,54	0,73	0,58	0,83	0,60	1,05	0,65
BG	0,35	0,30	0,39	0,34	0,63	0,53	0,93	0,81	1,75	1,45
R_2										
AG	0,35	0,50	0,54	0,79	0,70	1,08	0,76	1,15	0,90	1,15
BG	0,40	0,70	0,50	0,84	0,65	1,13	0,70	1,20	0,80	1,20
CG	0,45	0,70	0,65	1,00	0,65	1,05	0,75	1,11	0,85	1,15
AB	0,45	0,05	0,60	0,05	0,63	0,05	0,65	0,05	0,75	0,05
BC	0,45	0,05	0,60	0,05	0,65	0,05	0,70	0,05	0,75	0,05
CA	0,45	0,05	0,60	0,05	0,65	0,05	0,70	0,05	0,75	0,05
ABG	0,45	0,45	0,60	0,60	0,65	0,65	0,75	0,70	0,90	0,75
BCG	0,40	0,45	0,55	0,65	0,60	0,65	0,65	0,70	0,80	0,70
CAG	0,40	0,40	0,55	0,55	0,58	0,55	0,65	0,60	0,80	0,60
ABC	0,40	0,05	0,50	0,05	0,55	0,05	0,55	0,05	0,60	0,05
ABCG	0,40	0,05	0,50	0,05	0,55	0,05	0,65	0,05	0,75	0,05

Como estudo adicional, a potência de curto-circuito da subestação teve seu valor alterado objetivando verificar os impactos no sistema de proteção proposto. Diante disso, foi possível observar que um aumento de até 20% no nível de curto-circuito (de 31 MVA para

37 MVA) não impactou o sistema de proteção. No entanto, valores superiores causaram uma perda de coordenação entre a curva rápida do R_1 e o tempo mínimo de ruptura do F_4 , considerando que o tempo do fusível passou a ser inferior a 300 ms. Além disso, a redução de 50% no valor de curto-circuito (de 31 MVA para 15,5 MVA) também não impactou o sistema de proteção, pois o aumento do tempo de ruptura do fusível foi compensado pelo cálculo de um múltiplo de tempo maior. Contudo, o mesmo não ocorreu na proteção convencional, que, devido ao ajuste fixo, perdeu seletividade entre o tempo máximo de ruptura do F_1 e a curva retardada do R_1 , quando foi aplicada uma falta de 40Ω na barra 810.

Por fim, para verificar a robustez da metodologia, foi aplicado um erro de $\pm 10\%$ no banco de dados da carga, utilizado para estimar a corrente de falta no fusível. Observou-se que um erro visando aumentar a carga em 10% não impactou a coordenação da proteção, resultando somente em um acréscimo de até 0,1843 s e 0,0958 s nos tempos de atuação dos religadores R_1 e R_2 , respectivamente. Esses incrementos de tempo sucederam em um valor máximo e mínimo do ITC de 0,4136 s e 0,2027 s, respectivamente. Por outro lado, o decréscimo de 10% no valor da carga gerou uma perda de coordenação entre os dispositivos (o menor ITC obtido foi de 0,0996 s, muito menor que o valor estipulado de 200 ms, para uma falta AG de 40Ω na barra 820), contudo a seletividade ainda foi mantida. Diante disso, 75% dos casos tiveram um ITC maior que 200 ms e 83% maior que 190 ms. Em geral, houve uma redução de até 0,1271 s no tempo de operação do R_1 e de 0,1042 s para o R_2 . A Tabela 14 apresenta os ITCs obtidos considerando os erros aplicados.

Tabela 14 – ITC, em segundos, entre a curva retardada do religador adaptativo e o tempo máximo de ruptura do fusível, considerando erro nos dados de carga (Caso 2)

Local da falta	Erro +10%				Erro -10%			
	Resistência de falta (Ω)				Resistência de falta (Ω)			
	0,01	5	20	40	0,01	5	20	40
810	0,2030	0,2171	0,2474	0,3127	0,2030	0,2171	0,1917	0,1348
818	0,2701	0,2335	0,2846	0,2339	0,2701	0,2335	0,1887	0,2339
820	0,2634	0,2293	0,2708	0,2980	0,1829	0,2293	0,2359	0,0996
822	0,2608	0,2918	0,3063	0,4136	0,1769	0,1921	0,1843	0,1477
826	0,2245	0,2051	0,2152	0,2751	0,2245	0,2051	0,2152	0,2137
856	0,2369	0,2136	0,2122	0,2431	0,1974	0,2136	0,2122	0,2159
864	0,2222	0,2400	0,2425	0,2488	0,2222	0,2400	0,1929	0,2147
842	0,2265*	0,2416*	0,2423*	0,2617*	0,2103*	0,2327*	0,2082*	0,2033*
844	0,2186*	0,2393*	0,2451*	0,2723*	0,2109*	0,2312*	0,2109*	0,2069*
846	0,2458*	0,2447*	0,2632*	0,2550*	0,2361*	0,2350*	0,2166*	0,2215*
848	0,2451*	0,2431*	0,2614*	0,2495*	0,2357*	0,2333*	0,2151*	0,2203*
840	0,2584*	0,2481*	0,2454*	0,2527*	0,2475*	0,2381*	0,2322*	0,2424*

Nota: * valor médio

Diante do que foi apresentado, é possível verificar que a utilização da metodologia

para o cálculo da corrente de falta no fusível apresenta resultados satisfatórios, tendo em vista que tem pouco impacto na determinação do múltiplo de tempo do religador. Apesar de algumas simulações apresentarem um ITC menor que o mínimo estipulado (200 ms), os valores obtidos ficaram muito próximos do valor mínimo, o que não representa perda de coordenação. Ao aplicar erros no banco de dados da carga, observa-se que um erro positivo (ou seja, uma medição de carga maior que o valor real) aumenta o ITC, enquanto um erro negativo já se torna preocupante, dada a redução significativa do ITC. Entretanto, como o ITC é adotado justamente para cobrir os erros inerentes do processo de operação dos dispositivos de proteção, nada impede que o erro no banco de dados da carga seja considerado na determinação do valor mínimo. Por fim, também foi constatado que variações na potência de curto-circuito da subestação não impactam na proteção proposta. Ressalta-se que os tempos de operação dos fusíveis estão disponíveis no Apêndice B.

4.2.3 Caso 3

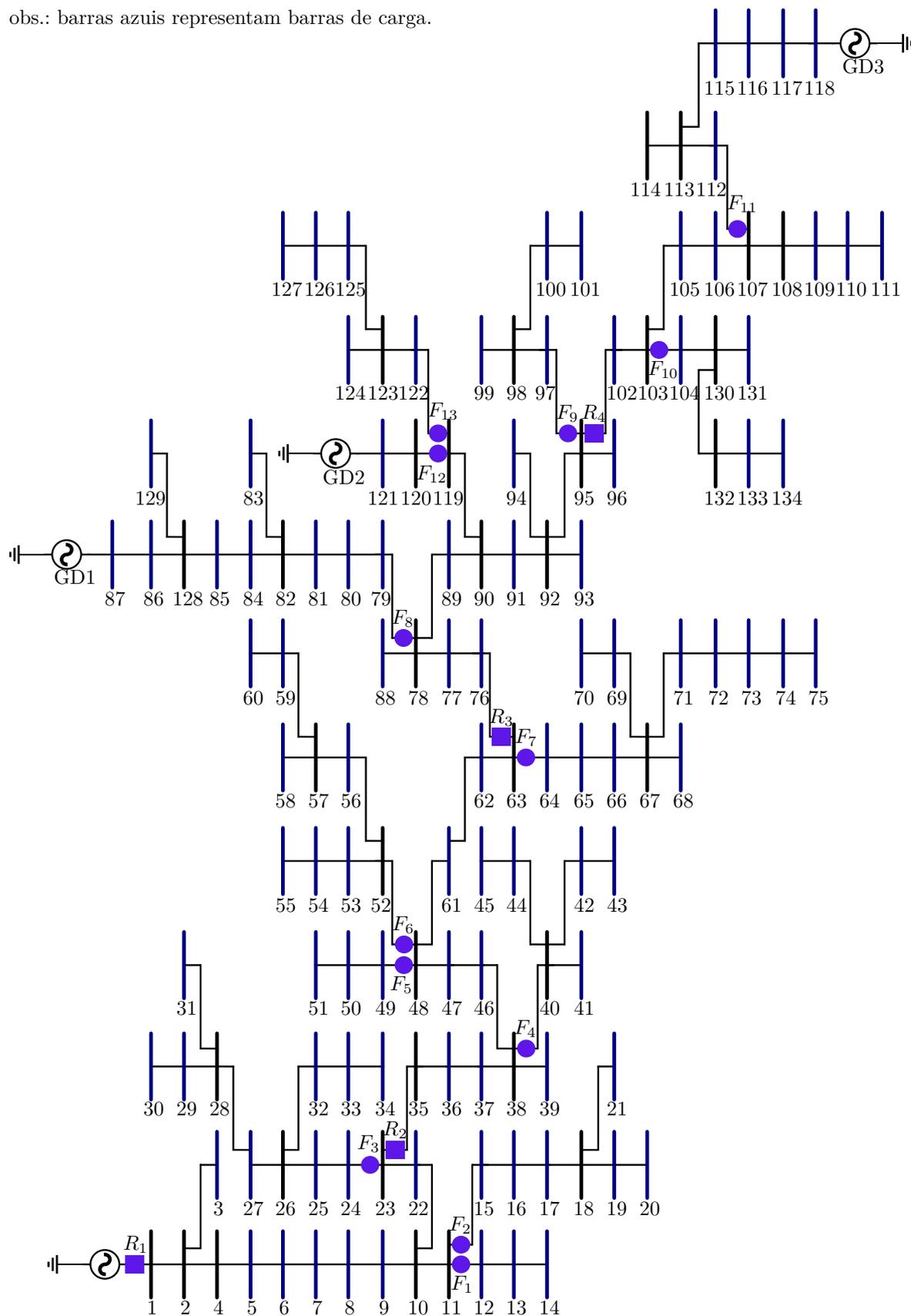
Este estudo visa aplicar o religador, com os ajustes adaptativos propostos, considerando a presença de medidores que fornecerão os valores das correntes de falta passante nos fusíveis. Neste caso, diferentemente dos anteriores, foi considerada a presença de três GDs, o que resultou em variações nas correntes do sistema elétrico em estudo e, conseqüentemente, na corrente de *pick-up*, conforme a inserção das GDs. Diante disso, o objetivo deste estudo é verificar o funcionamento dos ajustes automáticos do múltiplo de tempo e da corrente de *pick-up* do religador, tendo em vista o local onde se localiza a falta e a corrente do sistema elétrico no momento anterior ao curto-circuito.

O sistema teste de 134 barras, mostrado na Figura 17, foi utilizado neste estudo. Trata-se de um sistema balanceado, com tensão nominal de 13,8 kV e com cargas trifásicas com característica de impedância constante e fator de potência de 0,92. Além disso, este sistema apresenta carga nominal total de 7,065 MVA e potência de curto-circuito trifásica de 38 MVA na subestação. Mais informações sobre o sistema podem ser encontradas em Pereira (2007).

Como pode ser visto na Figura 17, foram modelados no *software* PSCADTM/EMTDCTM treze fusíveis (todos com corrente nominal de 100T) e quatro religadores com ajustes automáticos do múltiplo de tempo e da corrente de *pick-up*, bem como com o esquema de bloqueio/transferência de *trip* e unidade direcional. A localização dos dispositivos de proteção, assim como a corrente nominal e o tipo dos fusíveis, foram retirados do arquivo cujo título é "Sistema Prático 135 Barras" presente no repositório de arquivos do LaPSEE (LAPSEE, 2021). Os religadores, com somente a proteção de fase, por sua vez, foram ajustados para que houvesse coordenação com os fusíveis dentro da sua zona de proteção. Assim, os religadores R_1 , R_2 , R_3 e R_4 tiveram suas atuações rápidas parametrizadas com tempo fixo de 200 ms, 150 ms, 100 ms e 50 ms, respectivamente. Além

Figura 17 – Sistema teste de distribuição de 134 barras para o Caso 3.

obs.: barras azuis representam barras de carga.



Fonte: Elaborada pelo autor.

disso, suas atuações retardadas foram baseadas na curva extremamente inversa da IEC 60255-151 (IEC, 2009), com múltiplos de tempo, para o ajuste convencional, de 0,60, 1,05, 3,30 e 25,75, respectivamente. Também para o ajuste convencional, foram adotadas as seguintes correntes de *pick-up* para os religadores R_1 , R_2 , R_3 e R_4 , respectivamente: 338 A, 238 A, 141 A e 59 A. As correntes de regime permanente, medidas por cada equipamento de proteção sem a presença das GDs, são mostradas na Tabela 15.

Tabela 15 – Correntes nos equipamentos de proteção sem GD (Caso 3)

Equipamento	Corrente (A)			Equipamento	Corrente (A)		
	Fase A	Fase B	Fase C		Fase A	Fase B	Fase C
F_1	5,85	5,85	5,88	F_{10}	15,07	15,08	15,17
F_2	21,02	21,03	21,12	F_{11}	7,12	7,12	7,16
F_3	29,38	29,39	29,53	F_{12}	1,10	1,10	1,11
F_4	14,07	14,08	14,15	F_{13}	8,91	8,91	8,97
F_5	11,01	11,01	11,07	R_1	259,36	259,42	260,85
F_6	14,31	14,32	14,40	R_2	181,96	182,00	183,09
F_7	25,51	25,51	25,66	R_3	107,87	107,89	108,56
F_8	25,56	25,57	25,72	R_4	45,17	45,18	45,47
F_9	7,93	7,93	7,98	–	–	–	–

As GDs, localizadas nas barras 87, 118 e 121, foram inseridas com uma impedância de curto-circuito $R+jX$ de $0,26+j47,25 \Omega$, o que resultou em uma potência de curto-circuito de 4 MVA. A Tabela 16 apresenta as correntes medidas por cada equipamento de proteção com a presença das GDs. Observe que houve uma redução significativa na corrente através do fusível F_8 e nos quatro religadores. Ademais, para os fusíveis F_{11} e F_{12} houve um aumento na corrente. Ressalta-se que as GDs permanecem conectadas ao SD até que um religador seja operado. Portanto, a proteção da GD somente atua mediante o recebimento de um sinal de *trip* de um dos religadores.

Tabela 16 – Correntes nos equipamentos de proteção com GD (Caso 3)

Equipamento	Corrente (A)			Equipamento	Corrente (A)		
	Fase A	Fase B	Fase C		Fase A	Fase B	Fase C
F_1	6,09	6,09	6,11	F_{10}	15,77	15,77	15,83
F_2	21,89	21,90	21,95	F_{11}	17,78	17,50	17,48
F_3	30,62	30,62	30,71	F_{12}	24,09	23,80	23,83
F_4	14,67	14,68	14,72	F_{13}	9,32	9,32	9,35
F_5	11,50	11,50	11,53	R_1	195,94	196,94	197,35
F_6	14,94	14,94	14,99	R_2	115,48	116,47	116,64
F_7	26,65	26,65	26,73	R_3	38,82	39,86	39,52
F_8	3,60	3,91	3,36	R_4	22,41	22,74	22,75
F_9	8,30	8,30	8,33	–	–	–	–

A Tabela 17 apresenta as correntes mínimas e máximas de curto-circuito, vistas

por cada dispositivo de proteção, sem a presença das GDs no SD. Comparando com a Tabela 18, que apresenta os dados com a inserção das três GDs, verifica-se que todos os fusíveis tiveram um aumento considerável na corrente máxima que os atravessa e um aumento pouco significativo na corrente mínima de alguns fusíveis. Já os religadores tiveram redução na corrente mínima medida por esses dispositivos, enquanto a corrente máxima permaneceu praticamente inalterada. A exceção é para o religador R_4 , que teve sua corrente de curto-circuito aumentada quando uma falta franca foi aplicada. Ressalta-se que em nenhum caso a contribuição da GD foi suficiente para sensibilizar o fusível de forma reversa.

Tabela 17 – Mínimas e máximas correntes de curto-circuito medidas pelos fusíveis e pelos religadores sem GD (em ampere)

Equipamento	Corrente		Equipamento	Corrente	
	Mínima	Máxima		Mínima	Máxima
F_1	292,19	1.325,86	F_{10}	291,57	1.229,52
F_2	304,89	1.333,96	F_{11}	263,52	1.157,56
F_3	311,08	1.342,35	F_{12}	285,85	1.252,34
F_4	302,06	1.330,11	F_{13}	286,27	1.247,83
F_5	297,51	1.309,03	R_1	471,20	1.589,86
F_6	296,27	1.305,62	R_2	405,38	1.352,16
F_7	305,04	1.302,07	R_3	343,84	1.302,57
F_8	304,91	1.286,45	R_4	293,07	1.237,95
F_9	286,57	1.236,85	–	–	–

Tabela 18 – Mínimas e máximas correntes de curto-circuito medidas pelos fusíveis e pelos religadores com GD (em ampere)

Equipamento	Corrente		Equipamento	Corrente	
	Mínima	Máxima		Mínima	Máxima
F_1	322,01	1.785,56	F_{10}	328,13	1.694,72
F_2	336,05	1.798,09	F_{11}	249,20	1.429,06
F_3	343,77	1.820,69	F_{12}	270,48	1.563,80
F_4	335,72	1.807,31	F_{13}	321,67	1.721,38
F_5	332,17	1.799,36	R_1	369,34	1.590,58
F_6	330,10	1.787,39	R_2	297,70	1.351,57
F_7	340,84	1.792,21	R_3	231,15	1.301,70
F_8	291,24	1.609,04	R_4	281,09	1.544,39
F_9	322,29	1.704,71	–	–	–

Curtos-circuitos trifásicos, trifásicos para o terra, bifásicos, bifásicos para o terra e monofásicos foram aplicados em todo o alimentador em estudo, totalizando 134 locais de falta. A resistência de falta foi definida em $0,01 \Omega$, 5Ω e 20Ω . Assim, 8.844 curtos-circuitos foram aplicados neste caso, considerando a presença e ausência das GDs.

Primeiramente, serão apresentados os resultados obtidos sem a presença das GDs. As correntes de *pick-up* calculadas pelos religadores adaptativos R_1 , R_2 , R_3 e R_4 , neste caso, foram 391 A, 275 A, 163 A e 68 A, respectivamente. Observe que elas são ligeiramente superiores às correntes de *pick-up* adotadas para os religadores com ajuste fixo. Diante disso, a Tabela 19 apresenta os tempos da operação retardada dos religadores com os ajustes adaptativos. Pode-se observar nesta tabela que, devido ao sistema estar totalmente equilibrado, os tempos obtidos, para um mesmo tipo de falta, são muito próximos, mesmo variando a(s) fase(s) envolvida(s). No entanto, o mesmo não pode ser dito para faltas do tipo trifásicas. Além disso, observa-se que o religador R_4 obteve em 25% dos casos de curto-circuito envolvendo mais de uma fase, o menor tempo de atuação possível (0,05 s).

Tabela 19 – Avaliação estatística dos tempos de atuação retardada dos religadores R_1 , R_2 , R_3 e R_4 para o Caso 3, considerando a proteção adaptativa

Tipo de falta	Tempo de operação (s)						
	Mín.	Primeiro quartil	Mediana	Terceiro quartil	Máx.	Média	Desvio padrão
R_1							
AG	0,4448	0,9905	1,4692	6,5116	32,3838	4,0927	5,7746
BG	0,4447	0,9856	1,4627	6,5032	32,3357	4,0850	5,7674
CG	0,4447	0,9740	1,4446	6,3161	31,4975	3,9834	5,6094
AB	0,2987	0,5398	0,7334	2,1679	6,6955	1,4559	1,3891
BC	0,2990	0,5096	0,6988	2,1193	6,5667	1,4226	1,3661
CA	0,2985	0,5461	0,7374	2,1486	6,6393	1,4541	1,3746
ABG	0,2692	0,5524	0,9970	4,6621	32,7819	3,2525	5,6395
BCG	0,2692	0,5249	0,9522	4,4848	36,1836	3,1734	5,5049
CAG	0,2692	0,5539	1,0111	4,6911	32,9748	3,2075	5,4470
ABC	0,2575	0,4399	0,5295	0,9896	3,0585	0,7585	0,4885
ABCG	0,2576	0,4727	0,8068	4,4881	22,7337	2,7132	4,1033
R_2							
AG	0,3239	0,5987	1,4400	2,7805	30,5726	4,0218	7,7761
BG	0,3223	0,5974	1,4325	2,7784	30,5486	4,0170	7,7707
CG	0,3193	0,5903	1,4168	2,7228	29,9598	3,9263	7,5658
AB	0,2130	0,3236	1,0705	1,2024	5,6638	1,2069	1,4808
BC	0,2047	0,3110	1,0542	1,1589	5,5464	1,1742	1,4524
CA	0,2147	0,3249	1,0444	1,1986	5,6255	1,2019	1,4698
ABG	0,1920	0,4280	1,0568	2,2058	30,7937	3,6515	7,7055
BCG	0,1859	0,4142	1,0176	2,1553	29,9083	3,6565	7,7737
CAG	0,1918	0,4321	1,0563	2,1977	28,7320	3,5566	7,4775

continua ...

... continuação

Tipo de falta	Tempo de operação (s)						
	Mín.	Primeiro quartil	Mediana	Terceiro quartil	Máx.	Média	Desvio padrão
ABC	0,1726	0,2321	0,4948	0,9507	2,6304	0,6724	0,6350
ABCG	0,1734	0,3712	0,9398	2,1282	21,4633	2,7767	5,4166
R_3							
AG	0,1193	0,2373	0,9916	2,3122	38,8144	4,9979	10,5467
BG	0,1187	0,2368	0,9912	2,3072	37,8249	4,9773	10,4970
CG	0,1175	0,2338	0,9755	2,2791	36,2990	4,8001	10,0637
AB	0,0830	0,1304	0,4292	1,3833	5,7482	1,1900	1,6997
BC	0,0822	0,1251	0,4192	1,3281	5,6230	1,1557	1,6628
CA	0,0784	0,1299	0,4271	1,3912	5,7197	1,1836	1,6925
ABG	0,0716	0,1698	0,8171	1,9948	37,8814	4,8019	10,5476
BCG	0,0717	0,1634	0,7958	1,9223	38,5296	4,7986	10,6132
CAG	0,0691	0,1718	0,8208	1,8486	36,4196	4,6012	10,0437
ABC	0,0636	0,0873	0,1993	1,0025	2,4759	0,6351	0,7395
ABCG	0,0640	0,1478	0,7989	1,5926	24,5073	3,3322	6,9298
R_4							
AG	0,0500	0,0508	1,4691	3,0398	64,8059	9,0045	16,7501
BG	0,0500	0,0507	1,4622	3,0337	64,7814	8,9960	16,7406
CG	0,0500	0,0501	1,4588	2,9952	61,4733	8,6147	15,9237
AB	0,0500	0,0500	1,1008	1,7121	7,6119	1,7523	2,2178
BC	0,0500	0,0500	1,0483	1,6281	7,3148	1,6830	2,1381
CA	0,0500	0,0500	1,1143	1,7285	7,5931	1,7549	2,2106
ABG	0,0500	0,0500	1,0626	2,4109	70,3263	9,0543	17,5656
BCG	0,0500	0,0500	1,0133	2,3756	71,8808	9,1310	17,8134
CAG	0,0500	0,0500	1,0807	2,3706	64,9897	8,5472	16,4154
ABC	0,0500	0,0500	0,9068	1,2118	3,0883	0,9220	0,9095
ABCG	0,0500	0,0500	0,9012	1,9673	36,1146	5,5200	10,0100

A Tabela 20 apresenta os tempos de atuação retardada dos religadores com os ajustes convencionais. Comparando os resultados obtidos com os da Tabela 19, é possível verificar que, para a coluna do tempo mínimo de operação, quanto mais distante da subestação, maior a diferença de tempo observada entre a atuação com o religador adaptativo e o convencional. Em média, o religador convencional R_1 possui um tempo mínimo de operação 8,8 vezes maior que o religador adaptativo R_1 . Já os religadores convencionais R_2 , R_3 e R_4 possuem um tempo mínimo de cerca de 15,5, 49,1 e 128,9 vezes maior que os religadores

adaptativos, respectivamente. Quando analisamos os tempos das colunas da mediana e do máximo, percebemos que esse aumento já é menor, com uma maior diferença de 22,2 vezes (falta ABC do R_3) e 6,1 vezes (falta ABC do R_4), respectivamente. Por fim, a mesma conclusão pode ser obtida verificando a coluna da média, onde a maior diferença entre o tempo de operação do religador convencional e adaptativo é de 10,0 vezes, considerando o curto-circuito do tipo ABC visto pelo R_4 .

Tabela 20 – Avaliação estatística dos tempos de atuação retardada dos religadores R_1 , R_2 , R_3 e R_4 para o Caso 3, considerando a proteção convencional

Tipo de falta	Tempo de operação (s)						Desvio padrão
	Mín.	Primeiro quartil	Mediana	Terceiro quartil	Máx.	Média	
R_1							
AG	3,8793	7,5471	11,2123	40,4810	50,8435	20,1017	15,6027
BG	3,8787	7,5036	11,1831	40,4417	50,7901	20,0661	15,5995
CG	3,8787	7,4126	11,0347	39,6605	49,5665	19,7066	15,2434
AB	2,6286	4,4063	5,7602	16,9078	22,2874	9,1588	5,9507
BC	2,6316	4,1827	5,5546	16,5974	21,7540	8,9080	5,8792
CA	2,6272	4,4513	5,7848	16,7806	22,0992	9,1371	5,8719
ABG	2,3734	4,2987	7,8149	31,8647	37,7833	14,8394	12,6765
BCG	2,3735	4,1122	7,5341	31,0020	36,3726	14,3670	12,3173
CAG	2,3735	4,3031	7,9032	32,0033	38,0611	14,9246	12,7374
ABC	2,2722	3,6876	4,2352	8,2207	11,4738	5,4525	2,2758
ABCG	2,2730	3,7656	6,7272	31,0592	36,7023	14,0100	12,5922
R_2							
AG	4,9932	6,4209	10,0331	36,4547	43,7074	17,9107	13,9459
BG	4,9696	6,3893	10,0097	36,4321	43,6793	17,8848	13,9480
CG	4,9232	6,3155	9,8816	35,8230	42,8531	17,6059	13,6908
AB	3,3069	4,0604	5,3741	15,9922	20,7597	8,6387	5,6867
BC	3,1791	3,8413	5,1543	15,6788	20,2702	8,3886	5,6180
CA	3,3322	4,1080	5,4013	15,8907	20,6240	8,6279	5,6204
ABG	2,9838	3,8001	7,1089	29,8466	34,3794	13,7402	11,8983
BCG	2,8903	3,6331	6,8431	29,0881	33,2874	13,3318	11,6095
CAG	2,9810	3,8052	7,1909	29,9671	34,5945	13,8138	11,9466
ABC	2,6856	3,2760	3,7517	7,6328	10,5148	4,9754	2,1886
ABCG	2,6984	3,2856	6,1669	29,1376	33,7442	13,0384	11,8807
R_3							
AG	5,8496	7,2352	11,8469	44,8577	52,4650	21,7180	17,3914

continua ...

... continuação

Tipo de falta	Tempo de operação (s)						Desvio padrão
	Mín.	Primeiro quartil	Mediana	Terceiro quartil	Máx.	Média	
BG	5,8202	7,1997	11,8210	44,8362	52,4412	21,6912	17,3961
CG	5,7595	7,1162	11,6714	44,2031	51,6331	21,3909	17,1307
AB	4,0387	4,7706	6,5219	19,9299	25,4387	10,6850	7,1906
BC	3,8528	4,5042	6,2421	19,5089	24,8241	10,3547	7,0976
CA	4,0781	4,8371	6,5653	19,8377	25,3257	10,6876	7,1206
ABG	3,5234	4,2987	8,4537	37,6444	42,7287	17,0854	15,2448
BCG	3,3969	4,1207	8,1239	36,7894	41,5412	16,6053	14,9193
CAG	3,5210	4,3062	8,5546	37,7933	42,9689	17,1751	15,3004
ABC	3,1301	3,6831	4,4157	9,3123	12,5747	5,9385	2,7768
ABCG	3,1494	3,6920	7,3573	36,9614	42,2518	16,2981	15,2902
R_4							
AG	9,0037	11,1376	18,6468	74,0934	85,1684	35,4048	29,6180
BG	8,9586	11,0879	18,6086	74,0671	85,1367	35,3667	29,6259
CG	8,8586	10,9573	18,3745	73,0836	83,9788	34,9044	29,2199
AB	6,3186	7,5848	10,3767	31,6510	39,6283	17,0951	11,7710
BC	5,9717	7,1159	9,8895	30,9050	38,6092	16,5115	11,5975
CA	6,4018	7,7076	10,4660	31,5505	39,5307	17,1312	11,6781
ABG	5,4055	6,7233	13,1829	62,7517	70,3901	28,0687	26,0618
BCG	5,1815	6,4159	12,6363	61,3212	68,5658	27,2758	25,5235
CAG	5,4093	6,7393	13,3556	63,0023	70,7731	28,2268	26,1603
ABC	4,6898	5,6075	6,7350	14,3737	18,9477	9,1836	4,5301
ABCG	4,7124	5,6043	11,5515	61,7690	69,9267	26,8990	26,2577

Investigando os tempos obtidos pelos dois modelos de religadores falta a falta, é possível observar que em alguns casos o religador convencional R_1 foi mais rápido que o adaptativo (faltas ABG e CAG de $20\ \Omega$ nas barras 12, 13 e 14 e falta BCG de $20\ \Omega$ na barra 14 – maior diferença de 4,6393s), contudo o religador convencional foi mais lento em média 11,0066s com uma maior diferença de 42,0087s (falta AG de $20\ \Omega$ na barra 118). O mesmo é visto para o religador R_2 , que possui um tempo mais rápido para o ajuste convencional nos curtos-circuitos ABG e BCG de $20\ \Omega$ nas barras 51, 55, 59 e 60, além das faltas BCG de $20\ \Omega$ nas barras 49, 50, 54, 57 e 58 (maior diferença de 0,3923s). No entanto, o religador convencional R_2 foi mais lento, em média, 9,8268s, atingindo uma diferença de 40,3419s (falta AG de $20\ \Omega$ na barra 118). Já o religador convencional R_3 foi mais rápido nas faltas BCG de $20\ \Omega$ nas barras 120, 121 e 127 (maior diferença de 1,5272s).

Porém, como os anteriores, em média foi mais lento cerca de 14,4279 s com uma maior diferença de 51,3265 s (falta AG de 20 Ω na barra 118). Por fim, o religador convencional R_4 foi apenas mais rápido para o curto-circuito BCG de 20 Ω na barra 118 (diferença de 3,3150 s). Em média, foi mais lento cerca de 19,1898 s atingindo uma diferença de 77,6495 s (falta AG de 20 Ω na barra 111). Ressalta-se que, ao analisar somente os casos em que os religadores são os dispositivos primários de proteção, a diferença média dos tempos de operação sobe para 10,36 s, 10,9115 s, 14,4532 s e 24,5362 s para os religadores R_1 , R_2 , R_3 e R_4 , respectivamente.

A Tabela 21 mostra os valores médios dos ITCs obtidos entre a curva retardada do religador adaptativo e o tempo máximo de ruptura do fusível a jusante envolvido na falta. Ao comparar com a Tabela 22, que apresenta os ITCs considerando os religadores convencionais, é possível observar que os ITCs dos religadores adaptativos são sempre menores que os dos religadores convencionais, estando muito próximos do valor mínimo estipulado (200 ms) e quanto mais distante da subestação, menores serão os valores obtidos. Ademais, pode-se observar que os intervalos obtidos pelos religadores convencionais foram, em sua maioria, superiores a 3 s, com ITCs de até 32 s. Por fim, comenta-se também que faltas BCG de 20 Ω nas barras 14, 55, 118, 120 e 121 resultaram em ITCs abaixo do mínimo (o maior valor de ITC negativo foi de 2,9625 s para o curto-circuito na barra 118), o que exigiria um aumento nos múltiplos de tempo dos religadores convencionais.

Tabela 21 – ITC médio, em segundos, entre a curva retardada do religador e o tempo máximo de ruptura do fusível, considerando a proteção adaptativa (Caso 3)

Local da falta	Resistência de falta (Ω)			Local da falta	Resistência de falta (Ω)		
	0,01	5	20		0,01	5	20
12	0,5151	0,7940	2,0992	69	0,4091	0,3654	1,1787
13	0,5195	0,7980	1,9208	70	0,4118	0,3655	1,1019
14	0,5450	0,7766	1,4151	71	0,4118	0,3657	1,1389
15	0,5083	0,5486	2,1989	72	0,4163	0,3662	1,0470
16	0,5100	0,5495	2,1633	73	0,4210	0,3668	0,9558
17	0,5135	0,5510	2,0932	74	0,4233	0,3670	0,9102
18	0,5196	0,6336	1,9576	75	0,3908	0,3864	1,0480
19	0,5251	0,6366	1,8574	79	0,2332	0,2545	0,5315
20	0,5322	0,6404	2,1564	80	0,2373	0,2539	0,5419
21	0,5412	0,6449	2,0013	81	0,2392	0,2537	0,4863
24	0,5066	0,5657	2,8893	82	0,2341	0,2536	0,5187
25	0,5099	0,5676	2,8425	83	0,2324	0,2519	0,4780
26	0,5151	0,5707	2,7726	84	0,2373	0,2528	0,5165
27	0,5235	0,5179	2,6734	85	0,2323	0,2522	0,5363

continua ...

... continuação

Local da falta	Resistência de falta (Ω)			Local da falta	Resistência de falta (Ω)		
	0,01	5	20		0,01	5	20
28	0,5291	0,4612	2,6099	86	0,2355	0,2507	0,5214
29	0,5319	0,4618	2,5791	87	0,2368	0,2502	0,5604
30	0,5501	0,4070	2,3557	97	0,2397	0,3176	0,4696
31	0,5319	0,4618	2,5794	98	0,2364	0,3168	0,5560
32	0,5184	0,5729	2,7290	99	0,2452	0,3106	0,4347
33	0,5192	0,5734	2,7184	100	0,2389	0,3155	0,5074
34	0,5231	0,5178	2,6667	101	0,2462	0,3103	0,4168
40	0,3789	0,3698	0,9694	104	0,2063	0,2181	0,2591
41	0,3851	0,3697	0,8308	112	0,2064	0,2149	0,2542
42	0,3840	0,3698	0,8835	113	0,2080	0,2148	0,2467
43	0,3851	0,3697	0,8271	114	0,2054	0,2107	0,2956
44	0,3812	0,3701	0,9001	115	0,2071	0,2282	0,2689
45	0,3841	0,3701	1,0014	116	0,2109	0,2151	0,2544
49	0,3936	0,3767	1,3305	117	0,2121	0,2213	0,2704
50	0,3951	0,3768	1,2801	118	0,2157	0,2314	0,2894
51	0,4095	0,3777	1,0262	120	0,2301	0,3009	0,5107
52	0,3971	0,3824	0,7617	121	0,2344	0,2996	0,5378
53	0,4042	0,3827	1,1128	122	0,2305	0,3147	0,5131
54	0,4081	0,3828	1,5677	123	0,2357	0,2965	0,5620
55	0,3824	0,4237	0,9672	124	0,2373	0,2953	0,4605
56	0,3992	0,3826	1,1380	125	0,2373	0,2953	0,4557
57	0,4095	0,3830	1,5124	126	0,2407	0,3068	0,5912
58	0,3936	0,3828	1,2915	127	0,2440	0,3040	0,4620
59	0,3948	0,3826	1,4407	128	0,2336	0,2516	0,5727
60	0,3972	0,3821	1,3523	129	0,2389	0,2494	0,5402
64	0,3996	0,3650	1,0420	130	0,2078	0,2175	0,2693
65	0,4016	0,3652	1,1884	131	0,2075	0,2172	0,2806
66	0,4045	0,3653	1,1144	132	0,2076	0,2130	0,2761
67	0,4066	0,3654	1,0652	133	0,2089	0,2115	0,2639
68	0,4104	0,3654	1,1403	134	0,2072	0,2143	0,2702

Tabela 22 – ITC médio, em segundos, entre a curva retardada do religador e o tempo máximo de ruptura do fusível, considerando a proteção convencional (Caso 3)

Local da falta	Resistência de falta (Ω)			Local da falta	Resistência de falta (Ω)		
	0,01	5	20		0,01	5	20
12	3,6226	5,8072	8,6290	69	3,2021	5,3190	10,4817
13	3,6584	5,8567	8,4599	70	3,2242	5,3496	10,4291
14	3,8562	6,1242	7,5879	71	3,2223	5,3362	10,4490
15	3,5846	5,7827	12,4338	72	3,2564	5,3745	10,3817
16	3,5966	5,7996	12,4082	73	3,2909	5,4132	10,3151
17	3,6207	5,8333	12,3579	74	3,3081	5,4324	10,2818
18	3,6687	5,9002	12,2612	75	3,4043	5,5361	10,0923
19	3,7103	5,9515	12,1872	79	3,5580	6,3075	16,3036
20	3,7630	6,0156	12,0956	80	3,6149	6,3693	16,2252
21	3,8272	6,0928	11,9760	81	3,6396	6,3958	16,1925
24	3,5644	5,7612	13,9934	82	3,6645	6,4224	16,1603
25	3,5879	5,7955	13,9706	83	3,7331	6,5204	16,0748
26	3,6238	5,8473	13,9364	84	3,7062	6,4661	16,1075
27	3,6858	5,9261	13,8839	85	3,7313	6,4921	16,0761
28	3,7274	5,9781	13,8509	86	3,7735	6,5351	16,0252
29	3,7485	6,0040	13,8351	87	3,7904	6,5523	16,0050
30	3,8770	6,1600	13,7001	97	3,8888	6,6650	10,8160
31	3,7485	6,0039	13,8353	98	3,9588	6,7549	10,4830
32	3,6479	5,8817	13,9154	99	4,1176	6,9716	9,6694
33	3,6539	5,8903	13,9104	100	4,0056	6,8143	10,2586
34	3,6840	5,9328	13,8860	101	4,1370	6,9770	9,6431
40	2,9717	4,9925	8,5226	104	5,7057	10,4102	32,5922
41	3,0332	5,0806	8,2496	112	6,5292	11,4163	28,5288
42	3,0227	5,0661	8,2932	113	6,6816	11,5854	28,2413
43	3,0331	5,0808	8,2464	114	6,9538	11,9749	27,5710
44	2,9917	5,0127	8,4624	115	7,1837	12,3012	26,9161
45	3,0185	5,0393	8,3839	116	7,7185	13,0319	24,9660
49	3,0682	5,1216	7,4743	117	8,2833	13,7867	22,3813
50	3,0816	5,1352	7,4287	118	8,8680	14,5543	19,4417
51	3,1997	5,2514	7,0202	120	3,7674	6,5189	8,5638
52	3,1017	5,1615	8,2195	121	3,8270	6,5787	8,3131
53	3,1656	5,2518	7,9386	122	3,7879	6,5761	11,3725
54	3,1985	5,2973	7,7935	123	3,9745	6,8343	10,4449

continua ...

... continuação

Local da falta	Resistência de falta (Ω)			Local da falta	Resistência de falta (Ω)		
	0,01	5	20		0,01	5	20
55	3,3470	5,4930	7,0919	124	4,0035	6,8738	10,2993
56	3,1226	5,1916	8,1251	125	4,0035	6,8740	10,2951
57	3,2096	5,3124	7,7455	126	4,0624	6,9533	9,9990
58	3,2570	5,3692	7,5506	127	4,1218	7,0328	9,6890
59	3,2665	5,3807	7,5074	128	3,7481	6,5093	16,0556
60	3,2857	5,4031	7,4290	129	3,8173	6,5971	15,9564
64	3,1225	5,2216	10,6623	130	5,8173	10,5552	32,5071
65	3,1390	5,2408	10,6254	131	5,8434	10,5849	32,4844
66	3,1637	5,2694	10,5710	132	5,9796	10,7612	32,3928
67	3,1803	5,2885	10,5350	133	6,0453	10,8439	32,3425
68	3,2131	5,3343	10,4554	134	6,1115	10,9264	32,2673

Para finalizar os estudos sem as GDs, a Tabela 23 apresenta uma análise estatística dos múltiplos de tempo obtidos quando os curtos-circuitos são aplicados nas barras protegidas por fusíveis. Observe que os religadores R_1 , R_2 , R_3 e R_4 tiveram seus múltiplos de tempo ajustados a partir de 0,10, 0,20, 0,50 e 2,75, respectivamente. Com as correntes de *pick-up* determinadas por cada religador nesta condição, múltiplos de tempo de 0,40, 0,70, 2,45 e 20,10 seriam suficientes para coordenar os religadores R_1 , R_2 , R_3 e R_4 , respectivamente, com os fusíveis em que são retaguarda. Ademais, como esperado, os maiores múltiplos de tempo encontrados são menores que os adotados no ajuste convencional, tendo em vista que as correntes de *pick-up* determinadas pelos religadores adaptativos são maiores.

Quando as GDs foram colocadas, as correntes de *pick-up* determinadas pelos religadores adaptativos R_1 , R_2 , R_3 e R_4 foram 296 A, 175 A, 60 A e 34 A, respectivamente. Observa-se que são menores que as correntes de *pick-up* dos religadores convencionais, o que já resultaria em um menor tempo de operação da curva retardada para os religadores adaptativos.

Conforme comentado, as GDs são desconectadas quando um dos religadores é acionado. Assim, as GDs contribuem somente para o curto-circuito durante a primeira atuação dos religadores, que, neste estudo, possuem tempo fixo, conforme já descrito. As demais operações dos religadores ocorrem sem a contribuição das GDs; portanto, em suma, eles teriam os mesmos tempos apresentados até agora (tanto os religadores quanto os fusíveis) se os ajustes permanecessem os mesmos.

Como visto na seção 3.3, o ajuste da corrente de *pick-up* é baseado na corrente em regime permanente lida pelo religador; portanto, este ajuste não muda ao longo do ciclo de

Tabela 23 – Avaliação estatística do múltiplo de tempo, obtido pelo ajuste adaptativo, para faltas envolvendo religador e fusível (Caso 3)

Tipo de falta	Múltiplo de tempo									
	Mín.	1° quart.	2° quart.	3° quart.	Máx.	Mín.	1° quart.	2° quart.	3° quart.	Máx.
	R_1					R_2				
AG	0,10	0,10	0,10	0,20	0,25	0,20	0,20	0,20	0,45	0,55
BG	0,10	0,10	0,10	0,20	0,25	0,20	0,20	0,20	0,45	0,55
CG	0,10	0,10	0,10	0,20	0,25	0,20	0,20	0,20	0,45	0,55
AB	0,10	0,15	0,15	0,15	0,15	0,20	0,20	0,25	0,25	0,25
BC	0,10	0,15	0,15	0,15	0,15	0,20	0,20	0,25	0,25	0,25
CA	0,10	0,15	0,15	0,15	0,15	0,20	0,20	0,25	0,25	0,25
ABG	0,10	0,15	0,15	0,25	0,35	0,20	0,25	0,25	0,55	0,70
BCG	0,15	0,15	0,15	0,25	0,40	0,25	0,25	0,25	0,60	0,70
CAG	0,10	0,10	0,15	0,25	0,35	0,20	0,20	0,25	0,55	0,65
ABC	0,10	0,10	0,10	0,10	0,15	0,20	0,25	0,25	0,25	0,25
ABCG	0,10	0,10	0,10	0,20	0,25	0,20	0,20	0,25	0,40	0,50
	R_3					R_4				
AG	0,50	0,50	0,55	1,30	2,00	2,75	2,80	2,85	8,15	14,55
BG	0,50	0,50	0,55	1,30	1,95	2,75	2,80	2,85	8,15	14,55
CG	0,50	0,50	0,55	1,25	1,90	2,75	2,80	2,85	7,93	14,00
AB	0,55	0,55	0,55	0,60	0,65	2,90	2,93	3,00	3,25	3,70
BC	0,55	0,55	0,55	0,60	0,65	2,90	2,95	3,05	3,20	3,65
CA	0,55	0,55	0,60	0,60	0,65	2,90	2,93	3,00	3,25	3,70
ABG	0,60	0,60	0,65	1,55	2,35	2,90	3,18	3,40	9,65	19,15
BCG	0,60	0,60	0,60	1,55	2,45	2,95	3,23	3,45	9,90	20,10
CAG	0,55	0,60	0,65	1,45	2,25	2,95	3,15	3,40	9,15	17,60
ABC	0,55	0,60	0,60	0,60	0,60	3,00	3,10	3,20	3,28	3,45
ABCG	0,55	0,60	0,60	1,10	1,55	3,00	3,05	3,35	6,38	9,90

operação do religador durante o curto-circuito. Já o ajuste do múltiplo de tempo depende dos valores de corrente informados pelos medidores localizados juntos aos fusíveis, que podem variar com a presença ou ausência das GDs. Se o religador considerar somente uma operação rápida e as restantes retardadas, as correntes fornecidas pelos medidores levarão em conta a contribuição das GDs. Neste caso, apesar dos múltiplos de tempo calculados pelos religadores serem maiores do que os encontrados sem a presença das GDs no SD, devido à redução da corrente de *pick-up*, há uma perda de coordenação entre os religadores e fusíveis. Portanto, o religador opera, na maioria dos casos, antes do tempo máximo de ruptura do fusível envolvido na falta. Nesta situação, a coordenação é mantida apenas entre o religador R_4 e o fusível F_{11} .

Uma forma de resolver esse problema é adotar duas atuações rápidas e o restante retardadas. Diante disso, o múltiplo de tempo que será utilizado para ajustar a curva de operação retardada é obtido próximo à segunda atuação rápida. Deste modo, como as

GDs são desconectadas na primeira operação do religador, a segunda operação considera as correntes de curto-circuito sem a contribuição das GDs.

A Tabela 24 apresenta os tempos de operação retardada dos religadores com os ajustes adaptativos, considerando a presença das GDs no SD. Observa-se que os valores estão muito próximos dos valores obtidos na Tabela 19, principalmente os valores das colunas de mínimo e de máximo, e, na maioria dos casos, menores. Isso ocorre porque as correntes de *pick-up* são menores neste caso, o que leva a tempos de operação mais rápidos quando o religador é o único dispositivo de proteção. Também se deve ao fato de os tempos de ruptura dos fusíveis permanecerem os mesmos em ambos os casos, resultando em múltiplos de tempos maiores (como veremos a seguir), mas em tempos de operação sempre próximos ao do fusível. Desta forma, todas as análises realizadas comparando os tempos de operação dos religadores adaptativos com os convencionais se aplicam novamente aqui, porém, considerando agora uma operação ainda mais rápida quando estes são os equipamentos de proteção primários.

Tabela 24 – Avaliação estatística dos tempos de atuação retardada dos religadores R_1 , R_2 , R_3 e R_4 para o Caso 3, considerando a proteção adaptativa e as GDs

Tipo de falta	Tempo de operação (s)						
	Mín.	Primeiro quartil	Mediana	Terceiro quartil	Máx.	Média	Desvio padrão
R_1							
AG	0,2433	0,5134	0,7405	2,2328	32,9212	2,4047	5,2180
BG	0,2433	0,5111	0,7386	2,2311	32,8923	2,4014	5,2138
CG	0,2433	0,5056	0,7288	2,1922	32,3824	2,3544	5,0875
AB	0,1659	0,2925	0,3898	1,0284	6,1980	0,8555	1,0592
BC	0,1661	0,2770	0,3727	1,0083	5,0845	0,8319	1,0322
CA	0,1658	0,2957	0,3918	1,0243	6,1560	0,8535	1,0512
ABG	0,1500	0,2990	0,5164	1,8021	34,0004	2,1017	5,1855
BCG	0,1500	0,2849	0,4954	1,7547	33,2161	2,0957	5,2656
CAG	0,1500	0,2997	0,5230	1,8108	32,3371	2,0846	5,0811
ABC	0,1436	0,2408	0,2872	0,5366	2,6347	0,4909	0,4291
ABCG	0,1437	0,2579	0,4433	1,7391	22,8073	1,6999	3,7135
R_2							
AG	0,1251	0,2226	0,7785	1,2719	30,2588	3,2770	7,7502
BG	0,1246	0,2222	0,7781	1,2655	30,2421	3,2689	7,7291
CG	0,1234	0,2197	0,7673	1,2523	29,0423	3,1713	7,4600
AB	0,0836	0,1250	0,3758	1,0132	5,4960	0,8918	1,4378
BC	0,0804	0,1204	0,3690	0,9668	5,3982	0,8641	1,3968

continua ...

... continuação

Tipo de falta	Tempo de operação (s)						
	Mín.	Primeiro quartil	Mediana	Terceiro quartil	Máx.	Média	Desvio padrão
CA	0,0843	0,1255	0,3735	1,0231	5,4641	0,8904	1,4298
ABG	0,0756	0,1630	0,6581	0,9627	30,2008	3,0893	7,6409
BCG	0,0733	0,1580	0,6440	0,9303	30,1984	3,0821	7,6670
CAG	0,0755	0,1644	0,6604	0,9898	28,2897	2,9936	7,3318
ABC	0,0681	0,0909	0,1866	0,8237	2,1734	0,4787	0,6221
ABCG	0,0685	0,1425	0,6447	0,8282	20,4234	2,2863	5,3763
R_3							
AG	0,0500	0,0500	0,1106	2,2976	37,9316	4,6848	10,5199
BG	0,0500	0,0500	0,1106	2,2928	37,9157	4,6782	10,5053
CG	0,0500	0,0500	0,1092	2,2662	36,2615	4,5139	10,0862
AB	0,0500	0,0500	0,0532	1,3602	5,6873	1,0617	1,7170
BC	0,0500	0,0500	0,0521	1,3073	5,4669	1,0278	1,6648
CA	0,0500	0,0500	0,0530	1,3679	5,6616	1,0633	1,7133
ABG	0,0500	0,0500	0,0941	1,8481	37,6678	4,5510	10,4993
BCG	0,0500	0,0500	0,0920	1,8252	37,8838	4,5639	10,5630
CAG	0,0500	0,0500	0,0945	1,8238	35,7472	4,3547	9,9797
ABC	0,0500	0,0500	0,0500	0,9562	2,3284	0,5711	0,7371
ABCG	0,0500	0,0500	0,0926	1,5788	23,9694	3,0994	6,8651
R_4							
AG	0,0500	0,0500	1,4653	3,0066	64,7736	8,9695	16,7444
BG	0,0500	0,0500	1,4584	3,0007	64,6432	8,9560	16,7203
CG	0,0500	0,0500	1,4450	2,9630	61,3624	8,5780	15,9137
AB	0,0500	0,0500	1,0981	1,6971	7,5436	1,7354	2,2049
BC	0,0500	0,0500	1,0450	1,6212	7,2291	1,6691	2,1281
CA	0,0500	0,0500	1,1129	1,7133	7,5253	1,7390	2,1991
ABG	0,0500	0,0500	1,0579	2,3898	70,2932	9,0160	17,5409
BCG	0,0500	0,0500	1,0049	2,3535	71,7549	9,1003	17,8006
CAG	0,0500	0,0500	1,0780	2,3657	65,0012	8,5212	16,4172
ABC	0,0500	0,0500	0,8995	1,2017	3,0723	0,9151	0,9021
ABCG	0,0500	0,0500	0,8955	1,9494	35,9785	5,4869	9,9900

Comparando os tempos de operação dos dois modelos de religadores falta a falta, verifica-se novamente que em alguns casos os religadores convencionais continuam sendo mais rápidos que os adaptativos; no entanto, o número de situações em que isso ocorre

diminuiu. Para o religador R_1 , o ajuste convencional continua sendo mais rápido nas faltas ABG e BCG de $20\ \Omega$ na barra 14, além do curto-circuito BCG de $20\ \Omega$ na barra 12 (maior diferença de 1,6718 s). Quanto ao religador convencional R_2 , este foi mais rápido somente na falta BCG de $20\ \Omega$ na barra 55 (diferença de 0,5678 s). Já para o religador R_3 , o ajuste convencional apresenta um tempo menor quando há curtos-circuitos BCG de $20\ \Omega$ nas barras 120 e 121 (maior diferença de 0,8815 s). Finalmente, o religador convencional R_4 continua sendo mais rápido na falta BCG de $20\ \Omega$ na barra 118 (diferença de 3,1891 s). Quando os religadores são os dispositivos de proteção primários, a proteção adaptativa se torna mais rápida, com uma diferença de tempo de operação para os religadores R_1 , R_2 , R_3 e R_4 , em média de, respectivamente: 11,2798 s, 11,4613 s, 14,7031 s e 24,5665 s.

Para verificar o correto ajuste do múltiplo de tempo dos religadores adaptativos, na Tabela 25 os valores médios dos ITCs obtidos entre a curva retardada do religador e o tempo máximo de ruptura do fusível a jusante envolvido no curto-circuito são apresentados. Comparado com a Tabela 21, observa-se que os ITCs estão ainda mais próximos de 200 ms. Isso ocorre porque a redução na corrente de *pick-up* deslocou a curva de operação retardada do religador para um ponto onde a mudança no múltiplo de tempo (por exemplo, de 0,10 para 0,15) não resulta em um grande aumento no tempo de operação do dispositivo. Ou seja, os religadores adaptativos com as correntes de *pick-up* determinadas sem a contribuição das GDs, muito provavelmente, determinam seus múltiplos de tempo na parte mais acentuada da curva de tempo de operação retardada.

Tabela 25 – ITC médio, em segundos, entre a curva retardada do religador e o tempo máximo de ruptura do fusível, considerando a proteção adaptativa e as GDs (Caso 3)

Local da falta	Resistência de falta (Ω)			Local da falta	Resistência de falta (Ω)		
	0,01	5	20		0,01	5	20
12	0,2598	0,3521	0,7035	69	0,2546	0,3093	0,4478
13	0,2609	0,3501	0,6413	70	0,2560	0,3084	0,4178
14	0,2678	0,3822	1,1222	71	0,2561	0,3090	0,4040
15	0,2563	0,3781	0,7685	72	0,2585	0,3081	0,5612
16	0,2569	0,3779	0,7199	73	0,2531	0,3073	0,5172
17	0,2582	0,3771	0,7834	74	0,2543	0,3068	0,4648
18	0,2599	0,3751	0,5967	75	0,2613	0,3016	0,4848
19	0,2615	0,3739	0,8554	79	0,2062	0,2156	0,2414
20	0,2638	0,3723	1,0464	80	0,2068	0,2149	0,2497
21	0,2669	0,3705	1,1571	81	0,2084	0,2143	0,2299
24	0,2567	0,3983	1,0037	82	0,2075	0,2138	0,2345
25	0,2578	0,3979	0,9290	83	0,2070	0,2125	0,2403

continua ...

... continuação

Local da falta	Resistência de falta (Ω)			Local da falta	Resistência de falta (Ω)		
	0,01	5	20		0,01	5	20
26	0,2598	0,3976	0,8172	84	0,2082	0,2143	0,2385
27	0,2626	0,3975	0,8196	85	0,2043	0,2132	0,2435
28	0,2643	0,3966	0,7200	86	0,2042	0,2150	0,2415
29	0,2653	0,3962	0,6714	87	0,2037	0,2142	0,2318
30	0,2716	0,3931	1,0623	97	0,2084	0,2106	0,2421
31	0,2653	0,3962	0,6720	98	0,2066	0,2135	0,2390
32	0,2609	0,3975	0,7474	99	0,2072	0,2147	0,2337
33	0,2612	0,3975	0,8869	100	0,2066	0,2105	0,2433
34	0,2623	0,3970	0,8039	101	0,2079	0,2143	0,2528
40	0,2525	0,2850	0,5182	104	0,2014	0,2038	0,2135
41	0,2552	0,2814	0,4721	112	0,2015	0,2023	0,2176
42	0,2547	0,2820	0,3913	113	0,2029	0,2054	0,2179
43	0,2552	0,2814	0,4680	114	0,2023	0,2052	0,2181
44	0,2536	0,2845	0,4427	115	0,2025	0,2047	0,2104
45	0,2551	0,2834	0,4612	116	0,2031	0,2043	0,2208
49	0,2620	0,2867	0,4021	117	0,2028	0,2041	0,2162
50	0,2627	0,2862	0,4772	118	0,2031	0,2043	0,2164
51	0,2553	0,2820	0,5529	120	0,2048	0,2119	0,2326
52	0,2635	0,2909	0,4154	121	0,2049	0,2090	0,2356
53	0,2593	0,2873	0,6031	122	0,2062	0,2104	0,2378
54	0,2538	0,2855	0,4092	123	0,2050	0,2141	0,2484
55	0,2559	0,2899	0,5802	124	0,2051	0,2161	0,2418
56	0,2645	0,2898	0,4059	125	0,2051	0,2161	0,2367
57	0,2545	0,2850	0,3460	126	0,2047	0,2132	0,2345
58	0,2499	0,2823	0,5612	127	0,2057	0,2125	0,2390
59	0,2505	0,2816	0,5064	128	0,2053	0,2124	0,2332
60	0,2519	0,2955	0,4662	129	0,2044	0,2126	0,2218
64	0,2649	0,3124	0,5482	130	0,2018	0,2023	0,2149
65	0,2659	0,3119	0,5495	131	0,2020	0,2026	0,2176
66	0,2675	0,3111	0,4645	132	0,2021	0,2050	0,2201
67	0,2609	0,3104	0,5388	133	0,2023	0,2039	0,2177
68	0,2553	0,3089	0,4026	134	0,2027	0,2023	0,2136

Para concluir os estudos deste caso, a Tabela 26 apresenta uma análise estatística dos múltiplos de tempo obtidos quando as faltas são aplicadas nas barras protegidas por fusíveis. Como esperado, houve um aumento nos múltiplos de tempo calculados pelos

religadores quando comparados aos apresentados na Tabela 23. Neste caso, os religadores R_1 , R_2 , R_3 e R_4 tiveram seus múltiplos de tempo ajustados a partir de 0,15, 0,45, 3,65 e 11,00, respectivamente. Para a correta coordenação com todos os fusíveis dentro das suas respectivas zonas de proteção, os múltiplos de tempo dos religadores R_1 , R_2 , R_3 e R_4 devem ser ajustados no mínimo para 0,95, 2,30, 20,80 e 82,95, respectivamente.

Tabela 26 – Avaliação estatística do múltiplo de tempo, obtido pelo ajuste adaptativo e com as GDs, para faltas envolvendo religador e fusível (Caso 3)

Tipo de falta	Múltiplo de tempo									
	Mín.	1° quart.	2° quart.	3° quart.	Máx.	Mín.	1° quart.	2° quart.	3° quart.	Máx.
	R_1					R_2				
AG	0,15	0,15	0,20	0,50	0,75	0,45	0,45	0,50	1,50	1,90
BG	0,15	0,15	0,20	0,50	0,75	0,45	0,45	0,50	1,50	1,90
CG	0,15	0,15	0,20	0,50	0,75	0,45	0,45	0,50	1,50	1,85
AB	0,20	0,20	0,20	0,25	0,30	0,55	0,55	0,55	0,65	0,70
BC	0,20	0,20	0,20	0,25	0,25	0,55	0,55	0,55	0,65	0,70
CA	0,20	0,20	0,20	0,25	0,30	0,55	0,55	0,55	0,65	0,70
ABG	0,20	0,20	0,20	0,60	0,95	0,55	0,55	0,55	1,79	2,25
BCG	0,20	0,20	0,20	0,65	0,95	0,55	0,55	0,60	1,80	2,30
CAG	0,20	0,20	0,20	0,60	0,90	0,55	0,55	0,60	1,70	2,10
ABC	0,20	0,20	0,20	0,20	0,25	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
ABCG	0,20	0,20	0,20	0,45	0,65	0,55	0,55	0,55	1,30	1,55
	R_3					R_4				
AG	3,65	3,65	3,95	11,25	17,45	11,00	11,20	11,40	33,70	60,60
BG	3,65	3,69	3,95	11,25	17,45	11,00	11,20	11,40	33,65	60,50
CG	3,65	3,70	3,95	11,01	16,90	11,00	11,20	11,40	32,80	58,20
AB	4,05	4,10	4,13	4,75	5,20	11,50	11,70	12,05	13,08	14,95
BC	3,95	4,05	4,10	4,70	5,10	11,50	11,75	12,20	12,98	14,70
CA	4,10	4,10	4,45	4,75	5,20	11,50	11,68	12,05	13,08	14,95
ABG	4,25	4,40	4,60	13,05	20,25	11,55	12,75	13,65	39,63	79,20
BCG	4,20	4,40	4,50	13,36	20,80	11,70	12,90	13,70	40,78	82,95
CAG	4,15	4,35	4,85	12,46	19,15	11,80	12,58	13,55	37,60	72,85
ABC	4,15	4,30	4,30	4,40	4,50	11,95	12,40	12,80	13,10	13,65
ABCG	4,15	4,25	4,40	9,30	13,10	12,00	12,23	13,30	26,20	40,80

Diante dos resultados apresentados neste caso, é possível verificar que o ajuste da corrente de *pick-up* pode tornar mais rápida a operação retardada dos religadores adaptativos quando estes são os dispositivos de proteção primários. Contudo, tal modificação implica necessariamente no ajuste do múltiplo de tempo para que a coordenação correta seja mantida, quando fusíveis estão envolvidos no curto-circuito. Ademais, também é possível observar que, para manter a coordenação entre religador e fusível, o religador deve operar pelo menos duas vezes na curva rápida: a primeira para retirar a GD dentro da sua zona de operação (evitando a formação de ilhas) e a segunda para determinar o múltiplo de tempo da curva de atuação retardada. Se houvesse a possibilidade do religamento com

a GD suprindo o circuito defeituoso, não haveria necessidade de duas operações rápidas para o religador, visto que a corrente de curto-circuito que passa pelo fusível, neste caso, seria a mesma. Ressalta-se que os tempos de operação dos fusíveis estão disponíveis no Apêndice C.

4.3 Considerações Finais

Após a realização dos estudos, cujo foco principal foi analisar o funcionamento e desempenho do religador com os ajustes adaptativos da corrente de *pick-up* e do múltiplo de tempo, foi possível verificar a eficácia do dispositivo implementado em termos de eliminação das faltas propostas e coordenação com o fusível envolvido no curto-circuito.

Os resultados destes estudos permitiram concluir que é possível obter uma coordenação mais eficiente e, conseqüentemente, uma proteção mais rápida, pois, como pode ser visto nos resultados, houve reduções significativas nos tempos de operação dos religadores, enquanto a coordenação com os dispositivos a jusante permaneceu.

Para diferentes tipos de faltas, também foi abordada a influência da resistência de curto-circuito no sistema de proteção. De modo geral, o religador adaptativo também foi capaz de apresentar um desempenho satisfatório nestes casos apresentados.

Por fim, viu-se que a utilização das GDs acarreta na necessidade do uso de religadores com unidade direcional além de pelo menos duas atuações rápidas, a fim de se obter uma correta coordenação entre os dispositivos de proteção. Ademais, para o uso de dois ou mais religadores, é preferível adotar uma comunicação entre os dispositivos de modo a se obter um sistema de proteção mais adequado.

5 CONCLUSÃO

Segue-se uma nota geral dos principais resultados alcançados, de forma a proporcionar uma assimilação rápida e sucinta dos assuntos abordados e dos objetivos e resultados alcançados.

O Capítulo 1 apresentou uma introdução sobre a necessidade da utilização de equipamentos de proteção e meios que amparam o uso de dispositivos autoadaptativos, bem como pesquisas sobre redes inteligentes aplicadas ao sistema elétrico brasileiro. Também foi exposta uma revisão do estado da arte, na qual foi possível verificar que diversos trabalhos utilizam ajustes adaptativos, mas muitos não são realizados de forma automática, ou seja, ainda há necessidade de intervenção humana nos ajustes. Por fim, foi apresentada a estrutura deste trabalho juntamente com os objetivos gerais.

O Capítulo 2 expôs a importância do uso de equipamentos de proteção no sistema elétrico, além de apresentar uma revisão dos termos utilizados na literatura. Também, buscou-se explicar sobre os dispositivos que normalmente são utilizados nos SDs, ou seja, uma descrição dos fundamentos, construção, características técnicas e dimensionamento de chaves fusíveis, religadores e seccionadores automáticos. Por fim, foi detalhado como é feita a alocação e ajustes desses equipamentos e quais pontos devem ser observados durante a coordenação entre os dispositivos de proteção apresentados.

O Capítulo 3 explicou a implementação do religador com os ajustes automáticos do múltiplo de tempo e da corrente de *pick-up*. Primeiramente, foi feita uma introdução ao *software* PSCADTM/EMTDCTM, onde foram apresentadas as vantagens de sua utilização e como são criados os novos modelos. Posteriormente, foram apresentados os ajustes adaptativos a serem implementados no religador, onde foram expostas as considerações necessárias para sua utilização, como, por exemplo, as metodologias que podem ser empregadas para determinar o tempo de ruptura do fusível. Também foi apresentada a implementação do religador e fusível no *software*, bem como dos ajustes propostos.

O Capítulo 4 mostrou a aplicação do religador com os ajustes automáticos do múltiplo de tempo e da corrente de *pick-up* através de três estudos de caso:

- O Estudo 1 teve como objetivo verificar o funcionamento do religador proposto quando somente o múltiplo de tempo pode ser alterado. Com base neste estudo, concluiu-se que o religador autoadaptativo apresentou uma redução significativa nos tempos de atuação quando comparado ao religador convencional, principalmente quando se trata do dispositivo de operação primário. Ademais, foi possível constatar a eficiência do método proposto, tendo em vista a capacidade de se autocoordenar com o dispositivo protetor e diminuir o ITC entre os equipamentos.

- O Estudo 2 teve como objetivo principal demonstrar o funcionamento do religador proposto utilizando transmissores de falta. Assim, o múltiplo de tempo do religador foi determinado com base no cálculo da corrente de curto-circuito que passa pelo fusível, realizado pelo próprio equipamento. Neste estudo, concluiu-se que a metodologia apresenta resultados satisfatórios, com pouco impacto no ajuste do múltiplo de tempo. Também, verificou-se que mesmo com erros no banco de dados da carga, utilizado para estimar a corrente no fusível, o religador conseguiu se manter seletivo com o fusível a jusante, apesar de perder a coordenação em alguns casos. Além disso, observou-se a utilização da metodologia em situações onde há variação na potência de circuito-circuito da subestação, onde a maior preocupação está entre o tempo de atuação rápida do religador e o tempo mínimo de ruptura do fusível.
- Verificado o funcionamento do religador modificando o múltiplo de tempo, buscou-se variar a corrente que passa por este dispositivo através da inserção das GDs. Desta forma, a corrente de *pick-up* do equipamento também foi alterada de acordo com o valor da corrente lida em seus terminais. Neste estudo, foi visto que a alteração da corrente de *pick-up* permite que o dispositivo tenha uma operação retardada mais rápida, principalmente quando é o dispositivo de proteção primário. Além disso, constatou-se que para a correta coordenação entre os dispositivos de proteção, há necessidade de pelo menos duas operações rápidas do religador.

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a técnica proposta tornou-se uma alternativa aos religadores convencionais, tendo em vista os ganhos apresentados neste trabalho em relação à confiabilidade e segurança do sistema elétrico. Além disso, a metodologia apresentada não requer *hardware* com alto poder de processamento, considerando que a mudança da corrente de *pick-up* é realizada em regime permanente, não necessitando de um processamento rápido, e o ajuste do múltiplo de tempo pode ser realizado durante o tempo de religamento do dispositivo, sendo considerado longo, em termos de processamento.

A continuidade desta pesquisa pode investigar os seguintes aspectos:

- Estudos mais aprofundados com relação às GDs, para que algumas gerações permaneçam no sistema elétrico durante o curto-circuito e assim seja verificado o impacto de sua permanência no sistema de proteção;
- Estudos voltados para mudanças topológicas no SD, visando observar os impactos das reconfigurações da rede no sistema de proteção proposto;
- Cálculo da corrente de falta no fusível sem a necessidade de instalar transmissor ou medidor junto ao dispositivo, o que reduziria os custos de implantação da metodologia proposta;

- Projeto de outros equipamentos inteligentes, como relés e seccionadores e aplicação desses equipamentos junto ao religador autoadaptativo proposto;
- Estudos considerando o comportamento termodinâmico do fusível quando submetido a sucessivas operações de abertura e fechamento do religador, visando maior aproximação com a realidade;
- Incorporar a metodologia proposta em *hardware* e realizar uma avaliação de *hardware in-the-loop*.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Chamada N° 011/2010**: Projeto estratégico: “programa brasileiro de rede elétrica inteligente”. Brasília, DF, 2010. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/PeD_2008-ChamadaPE11-2010.pdf.
- ALAM, M. N.; DAS, B.; PANT, V. Optimum recloser–fuse coordination for radial distribution systems in the presence of multiple distributed generations. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 12, n. 11, p. 2585–2594, 2018.
- ANDERSON, P. M. **Power System Protection**. New York, NY: McGraw-Hill, 1999. 1307 p. ISBN 0780334272.
- ANDREWS, J. G. *et al.* What will 5G be? **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 32, n. 6, p. 1065–1082, June 2014. ISSN 0733-8716.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7282**: dispositivos fusíveis de alta tensão - dispositivos tipo expulsão - requisitos e métodos de ensaio. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2011.
- ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The internet of things: A survey. **Computer Networks**, v. 54, n. 15, p. 2787 – 2805, 2010. ISSN 1389-1286. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128610001568>.
- CAMINHA, A. C. **Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos**. 1. ed. São Paulo, Brasil: Edgard Blücher, 1977. 224 p. ISBN 8521201362.
- CHABANLOO, R. M. *et al.* Comprehensive coordination of radial distribution network protection in the presence of synchronous distributed generation using fault current limiter. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 99, p. 214 – 224, 2018. ISSN 0142-0615. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061517314023>.
- CHAITUSANEY, S.; YOKOYAMA, A. An appropriate distributed generation sizing considering recloser-fuse coordination. *In*: **2005 IEEE/PES Transmission Distribution Conference Exposition: Asia and Pacific**. [*S.l.*: *s.n.*], 2005. p. 1–6. ISSN 2160-8636.
- CHEN, C.-R.; LEE, C.-H.; CHANG, C.-J. Optimal overcurrent relay coordination in power distribution system using a new approach. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 45, n. 1, p. 217 – 222, 2013. ISSN 0142-0615. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061512005078>.
- CHRISTOPOULOS, C.; WRIGHT, A. **Electrical Power System Protection**. 2. ed. Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers, 1999. ISBN 0412817608.
- COURY, D. V.; OLESKOVICZ, M.; GIOVANINI, R. **Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: dos Relés Eletromecânicos aos Microprocessados Inteligentes**. 1. ed. São Carlos, Brasil: Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, 2011. 378 p. ISBN 9788585205782.

- DAWOUD, M. A.; IBRAHIM, D. K.; GILANY, M. Restoring recloser-fuse coordination in radial distribution networks with distributed generation. *In: 2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 170–175.
- ELEKTRO. **Norma ND.78**: Proteção de redes aéreas de distribuição. 2. ed. Campinas, SP, 2014. Disponível em: <https://www.elektro.com.br/fornecedores/normas-tecnicas>.
- ELOS. **MANUAL DE INSTRUÇÕES**: SIGMA F+E 3 2.0/ – SIGMA F+E 3 2.0 1250 A – SIGMA F+E 3 2.0 AC/DC – SIGMA F+E 3 2.0 AC/DC 1250 A. 2019. Disponível em: https://www.elos.com.br/downloads/NOVO_Manual%20SIGMA%20F+E%203%202.0%20-%20standard.pdf. Acesso em: 06 jul. 2022.
- FANI, B.; DADKHAH, M.; KARAMI-HORESTANI, A. Adaptive protection coordination scheme against the staircase fault current waveforms in pv-dominated distribution systems. **IET Generation, Transmission & Distribution**, Institution of Engineering and Technology, v. 12, p. 2065–2071(6), May 2018. ISSN 1751-8687.
- FARIA, W. R. *et al.* Protection system planning for distribution networks: A probabilistic approach. **Electric Power Systems Research**, v. 189, p. 106612, 2020. ISSN 0378-7796.
- FERRAZ, R. S. F. *et al.* Genetic optimisation-based distributed energy resource allocation and recloser-fuse coordination. **IET Generation, Transmission & Distribution**, Institution of Engineering and Technology, v. 14, p. 4501–4508(7), October 2020. ISSN 1751-8687.
- GERS, J. M.; HOLMES, E. J. **Protection of Electricity Distribution Networks**. 3. ed. London: The Institution of Engineering and Technology, 2011. 349 p. ISBN 9781849192231.
- GUTIERRES, L. F. F.; CARDOSO, G.; MARCHESAN, G. Recloser-fuse coordination protection for distributed generation systems: Methodology and priorities for optimal disconnections. *In: 12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6.
- HEWITSON, L. G.; BROWN, M.; BALAKRISHNAN, R. **Practical Power System Protection**. Oxford: Newnes, 2005. 288 p. ISBN 9780750663977.
- IEC. Measuring relays and protection equipment - Part 151: Functional requirements for over/under current protection. **IEC Std. 60255-151**, p. 63, Ago. 2009.
- IEEE. IEEE recommended practice for protection and coordination of industrial and commercial power systems (IEEE buff book). **IEEE Std 242-2001 (Revision of IEEE Std 242-1986) [IEEE Buff Book]**, p. 1–710, Dec 2001.
- IEEE. IEEE standard for inverse-time characteristics equations for overcurrent relays. **IEEE Std C37.112-2018 (Revision of IEEE Std C37.112-1996)**, p. 1–25, 2019.
- IEEE. **IEEE PES AMPS DSAS Test Feeder Working Group**. 2021. Disponível em: <https://cmte.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>. Acesso em: 06 jul. 2022.
- JAMALI, S.; BORHANI-BAHABADI, H. Self-adaptive relaying scheme of reclosers for fuse saving in distribution networks with DG. **International Journal of Power and Energy Research**, v. 1, 04 2017.

- KAMEL, A. *et al.* Protection coordination for distribution systems in presence of distributed generators. **Electric Power Components and Systems**, Taylor & Francis, v. 41, n. 15, p. 1555–1566, 2013.
- KHALIFA, L. S. *et al.* Enhancing recloser-fuse coordination using distributed agents in deregulated distribution systems. *In: 2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 948–955.
- KIM, M. H. *et al.* Method of recloser-fuse coordination in a power distribution system with superconducting fault current limiter. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, v. 20, n. 3, p. 1164–1167, June 2010. ISSN 1051-8223.
- 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.
- KUNDUR, P. **Power System Stability and Control**. New York, NY: McGraw-Hill, 1994. 1176 p. ISBN 007035958X.
- LAPSEE. **Sistemas Testes**. 2021. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/#!/departamentos/engenharia-eletrica/pesquisas-e-projetos/lapsee/downloads/materiais-de-cursos1193/>. Acesso em: 06 jul. 2022.
- MAKWANA, Y. M.; BHALJA, B. R.; GOKARAJU, R. Improvement in recloser-fuse coordination technique based on modification factor. **IEEE Systems Journal**, v. 14, n. 2, p. 2770–2779, 2020.
- MAMEDE FILHO, J. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 4. ed. Rio de Janeiro, RJ: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2013. 686 p. ISBN 9788521622116.
- MAMEDE FILHO, J.; MAMEDE, D. R. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2011. 1316 p. ISBN 9788521620129.
- Manitoba-Hdvc Research Centre. **USER'S GUID: A comprehensive resource for EMTD**. Manitoba, Canada: [S.l.: s.n.], 2010. v. 4.7. 248 p.
- MARDEGAN, C. S. **Proteção e Seletividade em Sistemas Elétricos Industriais**. 1. ed. São Paulo, SP: Atitude Editorial, 2012. 399 p. ISBN 9788565828000.
- 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. ISSN 0142-0615. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014206151832475X>.
- 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, n. 1, p. 176–185, Jan 2012. ISSN 0885-8977.
- NIKOLAIDIS, V. C.; PAPANIKOLAOU, E.; SAFIGIANNI, A. S. A communication-assisted overcurrent protection scheme for radial distribution systems with distributed generation. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 7, n. 1, p. 114–123, Jan 2016. ISSN 1949-3053.

- PEREIRA, R. A. F. **Localização de faltas em alimentadores de distribuição de energia elétrica usando medições esparsas de tensões**. 2007. 131 p. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, Brasil, 2007.
- PEREZ, L. G. *et al.* Application of adaptive reclosers to automatic distribution systems. *In: Proceedings of First International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems*. [S.l.: s.n.], 1995. p. 159–163.
- PHADKE, A. G.; THORP, J. S. **Computer Relaying for Power Systems**. 2. ed. Chichester, Inglaterra: John Wiley & Sons Ltd, 2009. 326 p. ISBN 9780470057131.
- REDES INTELIGENTES BRASIL. **Cidade Inteligente Aquiraz**. 201–. Disponível em: <http://redesinteligentesbrasil.org.br/cidade-inteligente-aquiraz.html>. Acesso em: 30 jul. 2019.
- REDES INTELIGENTES BRASIL. **InovCity - EDP Bandeirante**. 201–. Disponível em: <http://redesinteligentesbrasil.org.br/inovcity.html>. Acesso em: 30 jul. 2019.
- REZAEI, N.; HAGHIFAM, M.-R. Protection scheme for a distribution system with distributed generation using neural networks. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 30, n. 4, p. 235 – 241, 2008. ISSN 0142-0615. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014206150700097X>.
- S&C ELECTRIC COMPANY. **SMD Power Fuses - Outdoor Distribution**. 2019. Disponível em: <https://www.sandc.com/en/products--services/products/smd-power-fuses-outdoor-distribution/>. Acesso em: 06 jul. 2022.
- SCHNEIDER. **Religador série U com Controlador ADVC**: Manual de instalação, operação e manutenção. 2017. Disponível em: https://download.schneider-electric.com/files?p_enDocType=Catalog&p_File_Name=U-Series+Manual_PT.pdf&p_Doc_Ref=religador_trifasico_serie_u_adv. Acesso em: 06 jul. 2022.
- SEL. **SEL-FLT and SEL-FLR**: Fault and load transmitter and receiver system. 2021. Disponível em: <https://selinc.com/products/ft/>. Acesso em: 06 jul. 2022.
- SEL. **SEL Wireless Protection System**: SEL-FT50 fault transmitter, SEL-RP50 fault repeater, and SEL-FR12 fault receiver. 2021. Disponível em: <https://selinc.com/products/FT50/>. Acesso em: 06 jul. 2022.
- SHAH, P. H.; BHALJA, B. R. New adaptive digital relaying scheme to tackle recloser–fuse miscoordination during distributed generation interconnections. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 8, n. 4, p. 682–688, 2014.
- SINGH, M. Protection coordination in distribution systems with and without distributed energy resources - a review. **Protection and Control of Modern Power Systems**, v. 2, n. 27, p. 1 – 17, July 2017. ISSN 2367-0983.
- SOUZA JÚNIOR, F. das C. **Algoritmo auto-adaptativo para proteção de sobrecorrente instantânea**. 2016. 168 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, 2016.

- TANG, W.; YANG, H. Self-adaptive protection strategies for distribution system with dgs and fcls based on data mining and neural network. *In: 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I CPS Europe)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–5.
- YOUSAF, M.; MAHMOOD, T. Protection coordination for a distribution system in the presence of distributed generation. **Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences**, v. 25, p. 408–421, 01 2017.
- ZAYANDEHROODI, H. *et al.* An automated protection method for distribution networks with distributed generations using radial basis function neural network. *In: 2011 5th International Power Engineering and Optimization Conference*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 255–260.
- ZHANG, W. *et al.* Self-adaptive transformer differential protection. **IET Generation, Transmission & Distribution**, v. 7, n. 1, p. 61–68, Jan 2013. ISSN 1751-8687.
- ZHU, Y.; SONG, S.; WANG, D. Multiagents-based wide area protection with best-effort adaptive strategy. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 31, n. 2, p. 94 – 99, 2009. ISSN 0142-0615. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061508000975>.

APÊNDICES

APÊNDICE A – CASO 1

Neste apêndice serão apresentados os tempos de operação dos dispositivos de proteção do Caso 1 (subseção 4.2.1), comuns a ambas as análises (religador convencional e adaptativo), ou seja, os tempos de atuação do religador devido à curva rápida e os tempos de ruptura dos fusíveis. Diante disso, a Tabela 27 apresenta uma análise estatística dos tempos de operação do religador, devido à curva de atuação rápida, para cada tipo de curto-circuito, bem como valor de resistência simulada. Analisando a coluna do terceiro quartil, é possível constatar, independentemente do tipo e resistência de falta, que os tempos de operação ficaram abaixo de 1 s. Ademais, considerando 95% das simulações, o maior tempo de operação obtido foi de 0,7911 s.

Tabela 27 – Avaliação estatística dos tempos de atuação rápida do religador para o Caso 1

Tipo de falta	Resistência de falta (Ω)	Tempo de operação (s)						
		Mín.	Primeiro quartil	Mediana	Terceiro quartil	Máx.	Média	Desvio padrão
AG	0,01	0,0718	0,1837	0,3879	0,4287	2,1921	0,3785	0,3743
	5	0,0752	0,2018	0,4173	0,4552	4,6093	0,5340	0,8552
	20	0,1011	0,2767	0,5137	0,5449	69,3991	3,5109	13,2633
	40	0,1716	0,3957	0,6221	0,6709	0,6989	0,5270	0,1745
BG	0,01	0,0719	0,1749	0,4079	0,4685	3,2874	0,4222	0,5729
	5	0,0741	0,1942	0,4388	0,5020	8,6708	0,7089	1,6076
	20	0,1005	0,2678	0,5066	0,6007	0,6361	0,4242	0,1907
	40	0,1739	0,3976	0,6775	0,7707	0,8093	0,5704	0,2218
CG	0,01	0,0719	0,1777	0,4205	0,4825	3,8299	0,4736	0,7180
	5	0,0741	0,1971	0,4565	0,5162	12,5152	0,9456	2,4788
	20	0,1007	0,2744	0,5565	0,6162	0,6351	0,4387	0,1972
	40	0,1752	0,4084	0,7212	0,7903	0,8113	0,5892	0,2292
AB	0,01	0,0718	0,1455	0,2958	0,3317	1,4968	0,2900	0,2713
	5	0,0727	0,1568	0,3136	0,3481	2,9166	0,3925	0,5721
	20	0,0823	0,1983	0,3714	0,4004	14,9428	1,1650	3,2195
	40	0,1095	0,2552	0,4305	0,4683	0,4798	0,3534	0,1319
BC	0,01	0,0718	0,1453	0,3174	0,3632	1,9395	0,3246	0,3561
	5	0,0727	0,1559	0,3366	0,3826	4,2304	0,4728	0,8313
	20	0,0823	0,1951	0,3983	0,4393	17,6491	1,0341	3,5415
	40	0,1099	0,2586	0,4806	0,5280	0,5426	0,3876	0,1577

continua ...

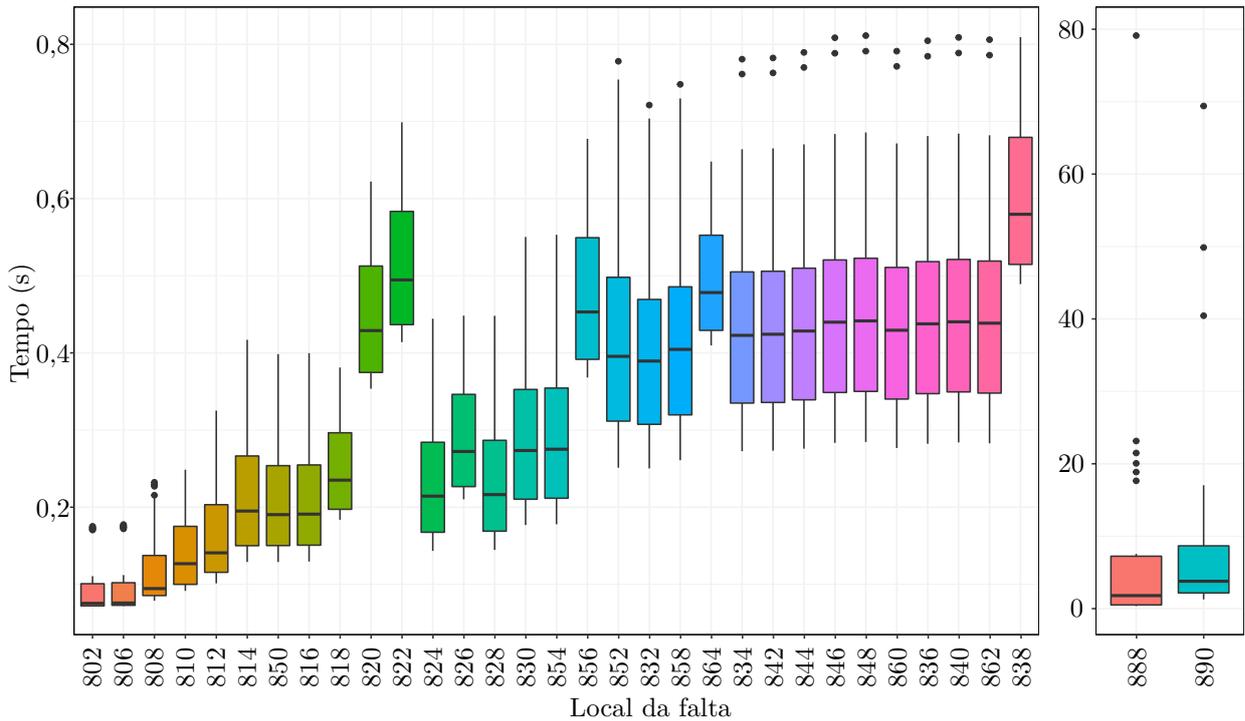
... continuação

Tipo de falta	Resistência de falta (Ω)	Tempo de operação (s)						Desvio padrão
		Mín.	Primeiro quartil	Mediana	Terceiro quartil	Máx.	Média	
CA	0,01	0,0718	0,1517	0,3276	0,3718	2,1654	0,3407	0,3986
	5	0,0727	0,1625	0,3465	0,3890	3,7809	0,4522	0,7348
	20	0,0821	0,2010	0,4069	0,4437	17,0422	1,2569	3,5660
	40	0,1106	0,2666	0,4763	0,5151	79,1224	3,6608	16,0739
ABG	0,01	0,0718	0,1336	0,2772	0,3167	1,5922	0,2828	0,2904
	5	0,0739	0,1498	0,3066	0,3444	4,7816	0,4979	0,9734
	20	0,0998	0,2139	0,3984	0,4320	23,1441	1,2678	4,6612
	40	0,1723	0,3257	0,5284	0,5742	0,5877	0,4435	0,1498
BCG	0,01	0,0718	0,1340	0,2829	0,3237	2,1741	0,3101	0,4018
	5	0,0739	0,1502	0,3132	0,3521	7,4162	0,6261	1,4938
	20	0,0999	0,2142	0,4016	0,4417	0,4541	0,3240	0,1310
	40	0,1739	0,3315	0,5447	0,5933	0,6067	0,4561	0,1566
CAG	0,01	0,0718	0,1364	0,2670	0,2997	1,4508	0,2694	0,2623
	5	0,0743	0,1528	0,2926	0,3232	3,5348	0,4248	0,7221
	20	0,1004	0,2188	0,3743	0,4004	40,4434	2,6454	8,7049
	40	0,1704	0,3177	0,4740	0,5123	0,5199	0,4048	0,1229
ABC	0,01	0,0718	0,1296	0,2512	0,2822	1,2777	0,2505	0,2297
	5	0,0722	0,1347	0,2613	0,2906	1,8707	0,2952	0,3535
	20	0,0755	0,1538	0,2901	0,3167	4,8884	0,5088	1,0294
	40	0,0852	0,1839	0,3294	0,3536	13,7830	1,0864	3,0084
ABCG	0,01	0,0718	0,1295	0,2546	0,2870	1,2886	0,2536	0,2320
	5	0,0740	0,1472	0,2840	0,3128	3,6639	0,4265	0,7525
	20	0,1002	0,2195	0,3728	0,3984	49,8664	3,0702	10,5193
	40	0,1712	0,3299	0,4851	0,5244	0,5306	0,4156	0,1248

As análises anteriores também podem ser realizadas na Figura 18, que expõe a distribuição dos tempos de atuação para cada local de falta. Na figura, verifica-se que em grande parte dos locais de curto-circuito o tempo ficou abaixo de 1s, tendo somente as faltas nas barras 888 e 890 apresentado valores superiores. Também, como era esperado, curtos-circuitos mais próximos à subestação geraram tempos de operação menores, independentemente da resistência de falta aplicada.

A Tabela 28 apresenta os tempos mínimo e máximo de ruptura de cada fusível para os diferentes valores de resistência de falta aplicada. Verifica-se que, com exceção da barra 890, para os curtos-circuitos com resistência de 0,01 Ω , o tempo de ruptura do fusível é

Figura 18 – Boxplots dos tempos de atuação rápida do religador para o Caso 1.



Fonte: Elaborada pelo autor.

relativamente baixo. Isso é um indício de que os fusíveis estão corretamente dimensionados.

Tabela 28 – Tempo de operação, em segundos, do fusível envolvido na falta (Caso 1)

Local da falta	Fusível	Resistência de falta (Ω)							
		0,01		5		20		40	
		Temp. mín.	Temp. máx.	Temp. mín.	Temp. máx.	Temp. mín.	Temp. máx.	Temp. mín.	Temp. máx.
810	F_1	0,3350	0,3954	0,4986	0,6094	1,5738	2,1661	9,6847	21,6726
818	F_2	0,5262	0,6362	0,6211	0,7609	1,0241	1,2867	1,8904	2,4992
820	F_2	1,5994	2,0691	1,8386	2,4191	2,8332	4,0426	5,7538	10,3040
822	F_2	2,1136	2,8253	2,4273	3,3188	3,8226	6,0932	8,4532	19,1357
826	F_3	0,6028	0,7369	0,7173	0,8872	1,2042	1,5261	2,3294	3,1698
856	F_4	0,8345	1,0665	0,9555	1,2296	1,4407	1,9001	2,4608	3,3377
888	F_5	0,7122*	0,9469*	32,0569*	53,7811*	-	-	-	-
890	F_5	30,9137*	56,6211*	80,7653*	>100*	-	-	-	-
864	F_6	0,7438	0,9517	0,8225	1,0474	1,1240	1,4193	1,6818	2,1531
842	F_7	0,8617*	1,2208*	0,9552*	1,3755*	1,3025*	1,9606*	1,9482*	3,0815*
844	F_7	0,8766*	1,2446*	0,9706*	1,4008*	1,3236*	1,9944*	1,9787*	3,1366*
846	F_7	0,9180*	1,3081*	1,0160*	1,4722*	1,3806*	2,0888*	2,0582*	3,2812*
848	F_7	0,9241*	1,3175*	1,0229*	1,4831*	1,3890*	2,1035*	2,0697*	3,3022*
862	F_8	0,9378*	1,2897*	1,0484*	1,4680*	1,4705*	2,1597*	2,3119*	3,6378*
838	F_8	1,3860	1,8254	1,5674	2,0771	2,2761	3,0535	3,6842	5,2534

- não sensibilizado; * valor médio

Na Tabela 29 são apresentados os ITCs obtidos entre o tempo mínimo de ruptura

do fusível e a curva rápida do religador. Constata-se, a partir dos valores, que os fusíveis estão corretamente dimensionados, pois respeitam o ITC mínimo (200 ms) e possuem tempos de ruptura próximos a este valor, para faltas com resistência de $0,01 \Omega$ (ressalvas ao fusível alocado na barra 890). Ademais, é visto que os curtos-circuitos com maior resistência apresentaram um ITC considerável somente em algumas barras.

Tabela 29 – ITC, em segundos, entre tempo mínimo de ruptura do fusível e a curva rápida do religador (Caso 1)

Local da falta	Resistência de falta (Ω)			
	0,01	5	20	40
810	0,2434	0,3958	1,4231	9,4361
818	0,3425	0,4192	0,7557	1,5095
820	1,2458	1,4569	2,3572	5,1317
822	1,6997	1,9831	3,2777	7,7543
826	0,3926	0,4852	0,8920	1,8811
856	0,4663	0,5560	0,9342	1,7834
888	0,2594*	30,4104*	-	-
890	13,6485*	78,8946*	-	-
864	0,3341	0,3869	0,6033	1,0338
842	0,5140*	0,5840*	0,8541*	1,3823*
844	0,5251*	0,5955*	0,8707*	1,4080*
846	0,5558*	0,6300*	0,9160*	1,4749*
848	0,5603*	0,6353*	0,9227*	1,4845*
862	0,5766*	0,6635*	1,0071*	1,7298*
838	0,8968	1,0442	1,6400	2,8749

- não sensibilizado; * valor médio

APÊNDICE B – CASO 2

Neste apêndice serão apresentados os tempos de ruptura dos fusíveis utilizados no Caso 2 (subseção 4.2.2), dado que os tempos de atuação rápida dos religadores, R_1 e R_2 , são fixos em 100 ms e 50 ms, respectivamente. Diante disso, a Tabela 30 apresenta os tempos mínimo e máximo de ruptura de cada fusível para os diferentes valores de resistência de falta aplicada. Pode-se observar que, para os curtos-circuitos com resistência de $0,01 \Omega$, o tempo de ruptura do fusível é relativamente baixo. O menor tempo de ruptura dos fusíveis foi de 0,1873 s e o maior foi de 2,8903 s. Esses tempos são uma indicação de que os fusíveis estão dimensionados corretamente.

Tabela 30 – Tempo de operação, em segundos, do fusível envolvido na falta (Caso 2)

Local da falta	Fusível	Resistência de falta (Ω)							
		0,01		5		20		40	
		Temp. mín.	Temp. máx.	Temp. mín.	Temp. máx.	Temp. mín.	Temp. máx.	Temp. mín.	Temp. máx.
810	F_1	0,6793	0,8189	0,7818	0,9372	1,2420	1,5093	2,3109	2,8903
818	F_2	0,4964	0,5996	0,5448	0,6565	0,7145	0,8665	1,0223	1,2545
820	F_2	0,9812	1,1985	1,0546	1,2912	1,3297	1,6226	1,7925	2,1873
822	F_2	1,1540	1,4181	1,2451	1,5227	1,5454	1,8891	2,0491	2,5112
820	F_3	0,3848	0,4669	0,4102	0,4998	0,5000	0,6123	0,6443	0,7848
822	F_3	0,4416	0,5410	0,4727	0,5761	0,5753	0,6954	0,7335	0,8838
826	F_4	0,3338	0,4075	0,3639	0,4426	0,4782	0,5859	0,6878	0,8413
856	F_5	0,3542	0,4339	0,3840	0,4661	0,4790	0,5843	0,6382	0,7768
864	F_6	0,3127	0,3995	0,3318	0,4253	0,3969	0,5084	0,4999	0,6449
842	F_7	0,5722*	0,6989*	0,6098	0,7442*	0,7346*	0,8919*	0,9260*	1,1227*
844	F_7	0,5789*	0,7074*	0,6168	0,7524*	0,7422*	0,9016*	0,9349*	1,1333*
846	F_7	0,5971*	0,7294*	0,6356	0,7747*	0,7627*	0,9271*	0,9582*	1,1619*
848	F_7	0,5998*	0,7325*	0,6383	0,7780*	0,7658*	0,9308*	0,9616*	1,1660*
846	F_8	0,2368*	0,2984*	0,2505	0,3161*	0,2950*	0,3749*	0,3645*	0,4665*
848	F_8	0,2377*	0,2996*	0,2515	0,3173*	0,2960*	0,3763*	0,3657*	0,4681*
840	F_9	0,3733*	0,4553*	0,3970	0,4845*	0,4761*	0,5804*	0,6047*	0,7320*

* valor médio

Na Tabela 31 são apresentados os ITCs obtidos entre o tempo mínimo de ruptura do fusível e a curva rápida do religador. Constata-se, a partir dos valores, que os fusíveis estão dimensionados corretamente, pois respeitam o ITC mínimo (200 ms) e apresentam tempos de ruptura próximos a este valor, para faltas com resistência de $0,01 \Omega$. Além disso, observa-se que os curtos-circuitos com maior resistência também apresentaram um ITC baixo.

Por fim, a Tabela 32 apresenta os ITCs entre os fusíveis em série (F2-F3 e F7-F8).

Tabela 31 – ITC, em segundos, entre tempo mínimo de ruptura do fusível e a curva rápida do religador (Caso 2)

Local da falta	Resistência de falta (Ω)			
	0,01	5	20	40
810	0.5793	0.6818	1.1420	2.2109
818	0.3964	0.4448	0.6145	0.9223
820	0.8812	0.9546	1.2297	1.6925
822	1.0540	1.1451	1.4454	1.9491
826	0.2338	0.2639	0.3782	0.5878
856	0.3042	0.3340	0.4290	0.5882
864	0.2627	0.2818	0.3469	0.4499
842	0.5346*	0.5714*	0.6939*	0.8836*
844	0.5415*	0.5785*	0.7016*	0.8922*
846	0.5595*	0.5969*	0.7223*	0.9148*
848	0.5621*	0.5996*	0.7253*	0.9182*
840	0.3382*	0.3628*	0.4435*	0.5735*

* valor médio

Novamente, nota-se valores bem próximos ao ITC mínimo, sendo o menor valor obtido 0,2121 s e o maior 1,1653 s.

Tabela 32 – ITC, em segundos, entre os tempos de ruptura dos fusíveis em série (Caso 2)

Local da falta	Resistência de falta (Ω)			
	0,01	5	20	40
820	0.5143	0.5548	0.7174	1.0077
822	0.6130	0.6690	0.8500	1.1653
846	0.2987*	0.3195*	0.3879*	0.4917*
848	0.3002*	0.3210*	0.3895*	0.4935*

* valor médio

APÊNDICE C – CASO 3

Neste apêndice serão apresentados os tempos de ruptura dos fusíveis utilizados no Caso 3 (subseção 4.2.3), dado que os tempos de atuação rápida dos religadores R_1 , R_2 , R_3 e R_4 são fixos em 200 ms, 150 ms, 100 ms e 50 ms, respectivamente. Diante disso, a Tabela 33 apresenta os tempos mínimo e máximo de ruptura de cada fusível para os diferentes valores de resistência de falta aplicada, sem a presença das GDs. Verifica-se que, mesmo se tratando de fusíveis de 100T, os mesmos apresentam tempos relativamente baixos para faltas com impedância de $0,01 \Omega$.

Tabela 33 – Tempo de operação médio, em segundos, do fusível envolvido na falta (Caso 3) sem GD

Local da falta	Fusível	Resistência de falta (Ω)					
		0,01		5		20	
		Temp. mín.	Temp. máx.	Temp. mín.	Temp. máx.	Temp. mín.	Temp. máx.
12	F1	0,5446	0,6574	1,0556	1,2885	9,5017	15,3455
13	F1	0,5507	0,6652	1,0683	1,3040	9,5982	15,5563
14	F1	0,5863	0,7076	1,1365	1,3881	10,1314	16,6642
15	F2	0,5386	0,6499	1,0258	1,2515	8,0829	12,4144
16	F2	0,5406	0,6523	1,0298	1,2564	8,1099	12,4653
17	F2	0,5445	0,6571	1,0379	1,2663	8,1636	12,5661
18	F2	0,5525	0,6674	1,0540	1,2865	8,2697	12,7628
19	F2	0,5593	0,6759	1,0661	1,3013	8,3427	12,8983
20	F2	0,5680	0,6865	1,0814	1,3199	8,4329	13,0674
21	F2	0,5787	0,6990	1,0996	1,3424	8,5410	13,2757
24	F3	0,5325	0,6425	1,0012	1,2217	7,4014	11,1501
25	F3	0,5364	0,6472	1,0092	1,2315	7,4503	11,2378
26	F3	0,5422	0,6543	1,0212	1,2460	7,5234	11,3689
27	F3	0,5519	0,6666	1,0389	1,2675	7,6200	11,5428
28	F3	0,5585	0,6750	1,0507	1,2821	7,6827	11,6568
29	F3	0,5619	0,6792	1,0566	1,2894	7,7134	11,7126
30	F3	0,5830	0,7040	1,0925	1,3335	7,9095	12,0651
31	F3	0,5619	0,6792	1,0565	1,2894	7,7130	11,7118
32	F3	0,5461	0,6592	1,0292	1,2556	7,5692	11,4509
33	F3	0,5471	0,6604	1,0312	1,2580	7,5804	11,4710

continua ...

... continuação

Local da falta	Fusível	Resistência de falta (Ω)					
		0,01		5		20	
		Temp. mín.	Temp. máx.	Temp. mín.	Temp. máx.	Temp. mín.	Temp. máx.
34	F3	0,5521	0,6668	1,0410	1,2701	7,6353	11,5700
40	F4	0,5437	0,6562	1,0327	1,2599	8,6359	13,5102
41	F4	0,5561	0,6721	1,0569	1,2899	8,8084	13,8650
42	F4	0,5540	0,6695	1,0529	1,2850	8,7813	13,8089
43	F4	0,5561	0,6721	1,0570	1,2900	8,8104	13,8692
44	F4	0,5472	0,6608	1,0378	1,2661	8,6651	13,5706
45	F4	0,5520	0,6670	1,0446	1,2746	8,7036	13,6496
49	F5	0,5579	0,6743	1,0620	1,2961	9,1411	14,5610
50	F5	0,5605	0,6774	1,0655	1,3004	9,1621	14,6051
51	F5	0,5821	0,7032	1,0954	1,3369	9,3379	14,9906
52	F6	0,5643	0,6820	1,0669	1,3020	8,8883	14,0346
53	F6	0,5777	0,6978	1,0918	1,3325	9,0705	14,4022
54	F6	0,5843	0,7056	1,1043	1,3480	9,1627	14,5885
55	F6	0,6133	0,7387	1,1594	1,4187	9,5532	15,4337
56	F6	0,5688	0,6874	1,0751	1,3121	8,9487	14,1576
57	F6	0,5866	0,7081	1,1086	1,3531	9,1910	14,6474
58	F6	0,5956	0,7185	1,1243	1,3727	9,2944	14,8697
59	F6	0,5974	0,7205	1,1275	1,3768	9,3175	14,9196
60	F6	0,6010	0,7246	1,1338	1,3849	9,3587	15,0088
64	F7	0,5674	0,6857	1,0610	1,2946	8,0332	12,3152
65	F7	0,5705	0,6894	1,0658	1,3005	8,0615	12,3695
66	F7	0,5754	0,6951	1,0731	1,3096	8,1038	12,4498
67	F7	0,5785	0,6988	1,0780	1,3156	8,1323	12,5031
68	F7	0,5852	0,7065	1,0902	1,3307	8,2085	12,6437
69	F7	0,5830	0,7040	1,0861	1,3257	8,1831	12,5970
70	F7	0,5874	0,7091	1,0943	1,3357	8,2339	12,6905
71	F7	0,5864	0,7080	1,0901	1,3306	8,2009	12,6306
72	F7	0,5928	0,7153	1,0999	1,3426	8,2551	12,7309
73	F7	0,5990	0,7224	1,1098	1,3547	8,3093	12,8307
74	F7	0,6022	0,7260	1,1148	1,3608	8,3365	12,8808
75	F7	0,6193	0,7459	1,1419	1,3958	8,4828	13,1574
79	F8	0,5830	0,7041	1,0831	1,3220	8,1614	12,5588
80	F8	0,5919	0,7144	1,0955	1,3372	8,2276	12,6824

continua ...

... continuação

Local da falta	Fusível	Resistência de falta (Ω)					
		0,01		5		20	
		Temp. mín.	Temp. máx.	Temp. mín.	Temp. máx.	Temp. mín.	Temp. máx.
81	F8	0,5958	0,7187	1,1008	1,3437	8,2553	12,7341
82	F8	0,5995	0,7230	1,1062	1,3502	8,2825	12,7848
83	F8	0,6105	0,7357	1,1270	1,3763	8,4093	13,0166
84	F8	0,6058	0,7302	1,1152	1,3613	8,3271	12,8677
85	F8	0,6096	0,7346	1,1205	1,3681	8,3535	12,9169
86	F8	0,6159	0,7419	1,1293	1,3795	8,3966	12,9965
87	F8	0,6184	0,7448	1,1329	1,3841	8,4136	13,0280
97	F9	0,6317	0,7607	1,1800	1,4460	10,2964	17,1085
98	F9	0,6430	0,7747	1,1993	1,4707	10,4417	17,4645
99	F9	0,6690	0,8072	1,2497	1,5343	10,8239	18,3897
100	F9	0,6505	0,7842	1,2125	1,4876	10,5397	17,7047
101	F9	0,6716	0,8105	1,2503	1,5351	10,8124	18,3692
104	F10	0,6398	0,7707	1,1807	1,4470	9,6214	15,5995
112	F11	0,7234	0,8721	1,3235	1,6275	11,4517	19,7951
113	F11	0,7390	0,8925	1,3464	1,6559	11,6129	20,1589
114	F11	0,7683	0,9291	1,4017	1,7245	12,0817	21,2392
115	F11	0,7935	0,9596	1,4477	1,7826	12,5151	22,2262
116	F11	0,8507	1,0296	1,5535	1,9195	13,4864	24,6920
117	F11	0,9123	1,1078	1,6641	2,0606	14,5163	27,5456
118	F11	0,9774	1,1894	1,7818	2,2135	15,6322	30,6428
120	F12	0,6152	0,7410	1,1664	1,4280	10,8893	18,5736
121	F12	0,6243	0,7518	1,1791	1,4446	10,9862	18,7945
122	F13	0,6191	0,7455	1,1659	1,4274	10,1146	16,6587
123	F13	0,6491	0,7823	1,2230	1,5007	10,5637	17,7288
124	F13	0,6538	0,7883	1,2322	1,5123	10,6314	17,8961
125	F13	0,6538	0,7883	1,2323	1,5123	10,6333	17,9009
126	F13	0,6635	0,8003	1,2511	1,5359	10,7720	18,2428
127	F13	0,6734	0,8124	1,2701	1,5599	10,9246	18,5919
128	F14	0,6121	0,7375	1,1241	1,3726	8,3708	12,9489
129	F14	0,6229	0,7501	1,1424	1,3964	8,4767	13,1522
130	F15	0,6513	0,7853	1,1987	1,4698	9,7420	15,8552
131	F15	0,6539	0,7886	1,2024	1,4745	9,7636	15,9009
132	F15	0,6678	0,8058	1,2251	1,5036	9,9141	16,2104

continua ...

... continuação

Local da falta	Fusível	Resistência de falta (Ω)					
		0,01		5		20	
		Temp. mín.	Temp. máx.	Temp. mín.	Temp. máx.	Temp. mín.	Temp. máx.
133	F15	0,6745	0,8141	1,2360	1,5174	9,9838	16,3554
134	F15	0,6812	0,8224	1,2471	1,5312	10,0519	16,5112

Na Tabela 34 são apresentados os ITCs obtidos entre o tempo mínimo de ruptura do fusível e a curva rápida do religador. Verifica-se que não houve nenhum caso de violação do valor mínimo (200 ms). Ademais, grande parte dos casos apresentou um valor de ITC próximo ao valor mínimo determinado, o que demonstra que os fusíveis estão bem parametrizados. Por fim, observa-se que um aumento da resistência de curto-circuito para 20Ω já acarreta em uma diferença significativa no tempo de operação entre os dispositivos de proteção.

Tabela 34 – ITC médio, em segundos, entre o tempo mínimo de ruptura do fusível e a curva rápida do religador, sem GD (Caso 3)

Local da falta	Resistência de falta (Ω)			Local da falta	Resistência de falta (Ω)		
	0,01	5	20		0,01	5	20
12	0,3693	0,9314	9,8846	69	0,4583	1,0130	8,5203
13	0,3761	0,9445	9,9820	70	0,4634	1,0212	8,5702
14	0,4164	1,0139	10,5112	71	0,4623	1,0172	8,5350
15	0,3611	0,8966	8,3760	72	0,4695	1,0271	8,5859
16	0,3633	0,9009	8,4025	73	0,4766	1,0374	8,6371
17	0,3677	0,9093	8,4555	74	0,4801	1,0426	8,6627
18	0,3766	0,9264	8,5605	75	0,4998	1,0708	8,8004
19	0,3843	0,9390	8,6310	79	0,5083	1,0606	8,5491
20	0,3942	0,9545	8,7183	80	0,5184	1,0732	8,6087
21	0,4064	0,9730	8,8230	81	0,5228	1,0789	8,6337
24	0,3526	0,8700	7,6552	82	0,5271	1,0845	8,6580
25	0,3571	0,8784	7,7039	83	0,5396	1,1059	8,7831
26	0,3638	0,8910	7,7771	84	0,5343	1,0939	8,6981
27	0,3745	0,9096	7,8722	85	0,5386	1,0995	8,7217
28	0,3820	0,9220	7,9339	86	0,5459	1,1088	8,7599
29	0,3859	0,9282	7,9641	87	0,5489	1,1125	8,7751
30	0,4098	0,9650	8,1561	97	0,5654	1,1665	10,7769

continua ...

... continuação

Local da falta	Resistência de falta (Ω)			Local da falta	Resistência de falta (Ω)		
	0,01	5	20		0,01	5	20
31	0,3859	0,9282	7,9636	98	0,5781	1,1865	10,9168
32	0,3682	0,8994	7,8231	99	0,6073	1,2376	11,2943
33	0,3693	0,9015	7,8344	100	0,5866	1,2001	11,0124
34	0,3747	0,9117	7,8894	101	0,6103	1,2385	11,2752
40	0,4165	0,9576	9,0253	104	0,6237	1,2158	10,0954
41	0,4305	0,9831	9,1980	112	0,7198	1,3653	11,9319
42	0,4281	0,9789	9,1713	113	0,7376	1,3896	12,0778
43	0,4305	0,9831	9,2001	114	0,7710	1,4471	12,5256
44	0,4205	0,9630	9,0515	115	0,7997	1,4948	12,9496
45	0,4258	0,9703	9,0861	116	0,8638	1,6055	13,9078
49	0,4319	0,9908	9,5621	117	0,9338	1,7201	14,9062
50	0,4349	0,9945	9,5807	118	1,0051	1,8391	15,9723
51	0,4597	1,0253	9,7356	120	0,5475	1,1525	11,4275
52	0,4389	0,9952	9,2880	121	0,5581	1,1660	11,5140
53	0,4540	1,0205	9,4648	122	0,5510	1,1500	10,5990
54	0,4615	1,0333	9,5552	123	0,5850	1,2087	11,0409
55	0,4945	1,0898	9,9412	124	0,5902	1,2179	11,1081
56	0,4440	1,0037	9,3469	125	0,5902	1,2179	11,1102
57	0,4641	1,0376	9,5828	126	0,6011	1,2370	11,2482
58	0,4744	1,0539	9,6821	127	0,6121	1,2564	11,3974
59	0,4765	1,0572	9,7047	128	0,5415	1,1033	8,7371
60	0,4806	1,0636	9,7443	129	0,5540	1,1222	8,8393
64	0,4408	0,9870	8,3772	130	0,6365	1,2346	10,2110
65	0,4443	0,9921	8,4042	131	0,6395	1,2384	10,2307
66	0,4498	0,9997	8,4440	132	0,6551	1,2617	10,3771
67	0,4533	1,0048	8,4708	133	0,6626	1,2728	10,4441
68	0,4609	1,0171	8,5452	134	0,6700	1,2842	10,5095

Quando colocado as GDs, apesar dos religadores convencionais não mudarem seus tempos de operação, os fusíveis, durante a permanência das GDs, estão sujeitos a uma possível aceleração de seus tempos de ruptura. Como veremos nos resultados a seguir, esta aceleração não foi suficiente para acarretar em uma perda de seletividade entre os dispositivos, mas pode acarretar em alguns casos de perda de coordenação, principalmente quando considerados os religadores mais próximos da subestação e os fusíveis em suas respectivas zonas de proteção, devido ao seu tempo de atuação baseado na curva rápida ser maior.

A Tabela 35 apresenta os tempos mínimo e máximo de ruptura de cada fusível para os diferentes valores de resistência de falta aplicada, considerando a presença das GDs. Nota-se que a maioria dos fusíveis apresentou uma redução no seu tempo de operação enquanto as GDs permanecem no SD. Somente os fusíveis F_8 , F_{11} , F_{12} e F_{14} apresentaram aumento nos seus tempos de operação quando a impedância de curto-circuito foi de 20Ω .

Tabela 35 – Tempo de operação médio, em segundos, do fusível envolvido na falta (Caso 3) com GD

Local da falta	Fusível	Resistência de falta (Ω)					
		0,01		5		20	
		Temp. mín.	Temp. máx.	Temp. mín.	Temp. máx.	Temp. mín.	Temp. máx.
12	F1	0,3034	0,3720	0,6762	0,8154	6,4075	9,4030
13	F1	0,3074	0,3768	0,6854	0,8267	6,4676	9,5114
14	F1	0,3308	0,4042	0,7355	0,8936	6,7965	10,0958
15	F2	0,2995	0,3672	0,6565	0,7926	5,5986	7,9587
16	F2	0,3007	0,3688	0,6595	0,7960	5,6153	7,9870
17	F2	0,3033	0,3719	0,6655	0,8028	5,6488	8,0435
18	F2	0,3086	0,3781	0,6777	0,8171	5,7154	8,1556
19	F2	0,3132	0,3834	0,6865	0,8280	5,7611	8,2327
20	F2	0,3192	0,3900	0,6974	0,8426	5,8181	8,3305
21	F2	0,3264	0,3985	0,7106	0,8607	5,8864	8,4499
24	F3	0,2920	0,3582	0,6318	0,7640	5,1795	7,2045
25	F3	0,2946	0,3612	0,6378	0,7711	5,2091	7,2550
26	F3	0,2984	0,3659	0,6468	0,7816	5,2529	7,3300
27	F3	0,3048	0,3736	0,6600	0,7965	5,3112	7,4300
28	F3	0,3091	0,3787	0,6688	0,8065	5,3506	7,4977
29	F3	0,3114	0,3813	0,6732	0,8117	5,3704	7,5311
30	F3	0,3255	0,3974	0,6992	0,8450	5,4872	7,7355
31	F3	0,3114	0,3813	0,6732	0,8117	5,3701	7,5306
32	F3	0,3009	0,3689	0,6528	0,7884	5,2802	7,3770
33	F3	0,3015	0,3697	0,6543	0,7900	5,2870	7,3888
34	F3	0,3047	0,3736	0,6617	0,7984	5,3211	7,4469
40	F4	0,2968	0,3639	0,6446	0,7792	5,8091	8,3386
41	F4	0,3043	0,3731	0,6627	0,7997	5,9131	8,5169
42	F4	0,3031	0,3715	0,6598	0,7964	5,8970	8,4884
43	F4	0,3043	0,3731	0,6627	0,7997	5,9143	8,5190
44	F4	0,2992	0,3668	0,6484	0,7835	5,8262	8,3675

continua ...

... continuação

Local da falta	Fusível	Resistência de falta (Ω)					
		0,01		5		20	
		Temp. mín.	Temp. máx.	Temp. mín.	Temp. máx.	Temp. mín.	Temp. máx.
45	F4	0,3024	0,3707	0,6535	0,7892	5,8485	8,4050
49	F5	0,2985	0,3659	0,6501	0,7854	5,9857	8,6546
50	F5	0,3001	0,3679	0,6526	0,7883	5,9973	8,6756
51	F5	0,3139	0,3844	0,6742	0,8130	6,0987	8,8513
52	F6	0,3025	0,3708	0,6542	0,7900	5,8546	8,4146
53	F6	0,3102	0,3800	0,6723	0,8106	5,9607	8,6003
54	F6	0,3142	0,3847	0,6815	0,8217	6,0133	8,6947
55	F6	0,3328	0,4067	0,7211	0,8746	6,2473	9,0973
56	F6	0,3050	0,3738	0,6602	0,7969	5,8901	8,4754
57	F6	0,3156	0,3862	0,6845	0,8254	6,0296	8,7235
58	F6	0,3215	0,3928	0,6955	0,8399	6,0900	8,8286
59	F6	0,3227	0,3942	0,6977	0,8430	6,1040	8,8522
60	F6	0,3251	0,3970	0,7021	0,8491	6,1288	8,8944
64	F7	0,3003	0,3680	0,6437	0,7780	5,3607	7,5240
65	F7	0,3022	0,3704	0,6473	0,7821	5,3763	7,5519
66	F7	0,3051	0,3739	0,6527	0,7882	5,3999	7,5933
67	F7	0,3070	0,3762	0,6562	0,7922	5,4157	7,6208
68	F7	0,3109	0,3808	0,6651	0,8024	5,4589	7,6967
69	F7	0,3096	0,3792	0,6621	0,7989	5,4443	7,6712
70	F7	0,3122	0,3823	0,6681	0,8058	5,4737	7,7222
71	F7	0,3120	0,3820	0,6650	0,8023	5,4538	7,6883
72	F7	0,3160	0,3867	0,6721	0,8104	5,4847	7,7420
73	F7	0,3202	0,3914	0,6792	0,8189	5,5156	7,7958
74	F7	0,3223	0,3938	0,6827	0,8233	5,5311	7,8231
75	F7	0,3337	0,4079	0,7017	0,8484	5,6145	7,9709
79	F8	0,3690	0,4501	0,8165	0,9901	9,9407	16,2961
80	F8	0,3755	0,4576	0,8269	1,0030	10,0520	16,5391
81	F8	0,3783	0,4610	0,8314	1,0086	10,0992	16,6408
82	F8	0,3812	0,4645	0,8358	1,0143	10,1455	16,7403
83	F8	0,3895	0,4748	0,8554	1,0395	10,3355	17,1426
84	F8	0,3858	0,4702	0,8432	1,0238	10,2217	16,9033
85	F8	0,3885	0,4736	0,8477	1,0295	10,2667	16,9995
86	F8	0,3931	0,4793	0,8550	1,0389	10,3395	17,1605

continua ...

... continuação

Local da falta	Fusível	Resistência de falta (Ω)					
		0,01		5		20	
		Temp. mín.	Temp. máx.	Temp. mín.	Temp. máx.	Temp. mín.	Temp. máx.
87	F8	0,3950	0,4815	0,8579	1,0427	10,3685	17,2269
97	F9	0,3305	0,4038	0,7034	0,8508	6,4231	9,4236
98	F9	0,3375	0,4127	0,7173	0,8694	6,5062	9,5762
99	F9	0,3532	0,4322	0,7529	0,9143	6,7282	9,9720
100	F9	0,3422	0,4186	0,7265	0,8817	6,5626	9,6793
101	F9	0,3553	0,4347	0,7532	0,9146	6,7194	9,9587
104	F10	0,3345	0,4089	0,7023	0,8493	6,0517	8,7613
112	F11	0,4696	0,5697	1,0112	1,2344	15,4361	30,5755
113	F11	0,4815	0,5830	1,0304	1,2587	15,7688	31,4806
114	F11	0,5050	0,6105	1,0833	1,3233	16,6340	33,9105
115	F11	0,5207	0,6290	1,1138	1,3604	17,2691	35,6704
116	F11	0,5632	0,6791	1,2000	1,4689	18,9593	40,6024
117	F11	0,6096	0,7348	1,2908	1,5843	20,8128	46,5156
118	F11	0,6592	0,7937	1,3850	1,7066	23,2225	53,4459
120	F12	0,3901	0,4755	0,8813	1,0726	14,4461	27,7912
121	F12	0,3966	0,4837	0,8922	1,0867	14,6380	28,3315
122	F13	0,3234	0,3953	0,6969	0,8418	6,3446	9,2817
123	F13	0,3420	0,4185	0,7380	0,8961	6,6055	9,7484
124	F13	0,3449	0,4221	0,7445	0,9043	6,6457	9,8200
125	F13	0,3449	0,4221	0,7445	0,9043	6,6469	9,8221
126	F13	0,3508	0,4294	0,7579	0,9204	6,7305	9,9696
127	F13	0,3570	0,4367	0,7718	0,9363	6,8155	10,1173
128	F14	0,3904	0,4759	0,8506	1,0333	10,2960	17,0642
129	F14	0,3988	0,4862	0,8682	1,0553	10,4529	17,4208
130	F15	0,3418	0,4181	0,7151	0,8664	6,1194	8,8780
131	F15	0,3435	0,4203	0,7177	0,8698	6,1314	8,8983
132	F15	0,3522	0,4310	0,7336	0,8906	6,2165	9,0409
133	F15	0,3566	0,4361	0,7413	0,9001	6,2560	9,1064
134	F15	0,3612	0,4413	0,7491	0,9095	6,2951	9,1712

Por fim, a Tabela 36 apresenta os ITCs obtidos entre o tempo mínimo de ruptura do fusível e a curva rápida do religador. Como já comentado, há uma perda de coordenação entre os dispositivos de proteção mais próximos da subestação quando a falta é de 0,01 Ω . Nesta situação, o menor ITC encontrado é para uma falta ABC na barra 24 (0,0404 s).

Para corrigir este problema, seria necessário aumentar a corrente nominal dos fusíveis ou fazer uma alocação das GDs de modo a não causar a perda de coordenação.

Tabela 36 – ITC médio, em segundos, entre o tempo mínimo de ruptura do fusível e a curva rápida do religador, com GD (Caso 3)

Local da falta	Resistência de falta (Ω)			Local da falta	Resistência de falta (Ω)		
	0,01	5	20		0,01	5	20
12	0,1152	0,5006	6,5056	69	0,1697	0,5336	5,5613
13	0,1196	0,5097	6,5631	70	0,1726	0,5395	5,5879
14	0,1463	0,5594	6,8809	71	0,1723	0,5364	5,5677
15	0,1102	0,4794	5,6677	72	0,1768	0,5435	5,5938
16	0,1116	0,4825	5,6839	73	0,1816	0,5505	5,6199
17	0,1144	0,4885	5,7164	74	0,1841	0,5540	5,6330
18	0,1203	0,5005	5,7798	75	0,1972	0,5727	5,7045
19	0,1255	0,5093	5,8212	79	0,2833	0,7543	10,5795
20	0,1324	0,5200	5,8724	80	0,2908	0,7650	10,6918
21	0,1406	0,5328	5,9347	81	0,2940	0,7695	10,7389
24	0,1014	0,4536	5,2439	82	0,2972	0,7739	10,7848
25	0,1042	0,4596	5,2737	83	0,3067	0,7938	10,9748
26	0,1084	0,4686	5,3179	84	0,3025	0,7815	10,8601
27	0,1154	0,4821	5,3732	85	0,3057	0,7860	10,9045
28	0,1202	0,4909	5,4094	86	0,3109	0,7935	10,9762
29	0,1227	0,4952	5,4273	87	0,3130	0,7964	11,0050
30	0,1389	0,5208	5,5329	97	0,2437	0,6252	6,5940
31	0,1227	0,4952	5,4270	98	0,2517	0,6388	6,6705
32	0,1111	0,4747	5,3451	99	0,2690	0,6748	6,8825
33	0,1118	0,4763	5,3518	100	0,2569	0,6479	6,7232
34	0,1154	0,4838	5,3842	101	0,2714	0,6752	6,8678
40	0,1569	0,5177	5,9407	104	0,2979	0,6733	6,2530
41	0,1653	0,5361	6,0396	112	0,4458	1,0008	16,3144
42	0,1639	0,5331	6,0243	113	0,4588	1,0205	16,6450
43	0,1653	0,5361	6,0409	114	0,4836	1,0755	17,5025
44	0,1596	0,5215	5,9544	115	0,4997	1,1057	18,1514
45	0,1631	0,5266	5,9720	116	0,5423	1,1910	19,8569
49	0,1583	0,5231	6,1293	117	0,5896	1,2805	21,7175
50	0,1601	0,5257	6,1386	118	0,6392	1,3748	24,0098
51	0,1756	0,5472	6,2223	120	0,3062	0,8203	15,4751
52	0,1626	0,5269	5,9853	121	0,3136	0,8310	15,6650

continua ...

... continuação

Local da falta	Resistência de falta (Ω)			Local da falta	Resistência de falta (Ω)		
	0,01	5	20		0,01	5	20
53	0,1711	0,5452	6,0866	122	0,2357	0,6185	6,5246
54	0,1756	0,5542	6,1370	123	0,2567	0,6591	6,7731
55	0,1970	0,5931	6,3632	124	0,2599	0,6658	6,8109
56	0,1654	0,5331	6,0192	125	0,2599	0,6658	6,8121
57	0,1772	0,5572	6,1528	126	0,2662	0,6796	6,8922
58	0,1841	0,5680	6,2096	127	0,2726	0,6934	6,9743
59	0,1855	0,5702	6,2229	128	0,3078	0,7890	10,9334
60	0,1882	0,5745	6,2461	129	0,3174	0,8064	11,0858
64	0,1594	0,5150	5,4866	130	0,3061	0,6858	6,3145
65	0,1615	0,5185	5,5005	131	0,3080	0,6884	6,3246
66	0,1647	0,5239	5,5211	132	0,3176	0,7039	6,4021
67	0,1669	0,5276	5,5348	133	0,3225	0,7118	6,4370
68	0,1711	0,5366	5,5746	134	0,3277	0,7200	6,4715

APÊNDICE D – TRABALHOS CIENTÍFICOS

A seguir são listados os trabalhos realizados e publicados, durante o período do doutorado, em congressos nacionais ou internacionais e revistas com elevada qualidade e fator de impacto.

Trabalhos derivados da área sob estudo:

1. MOMESSO, A. E. C.; KUME, G. Y.; FARIA, W. R.; PEREIRA, B. R.; ASADA, E. N. Automatic Recloser Adjustment for Power Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 37, n. 5, p. 3958-3967, 2022.

Este trabalho apresenta os resultados expostos na subseção 4.2.2 (Caso 2).

2. MOMESSO, A. E. C.; BARRA, P. H. A.; BARBALHO, P. I. N.; ASADA, E. N.; COURY, D. V.; BICZKOWSKI, M. Impactos de um sistema de armazenamento de energia transportável no sistema de proteção de redes de distribuição. In: **XV Seminário Técnico de Proteção e Controle (STPC)**, 2021.

Este artigo expõe o impacto de um sistema de armazenamento de energia transportável via baterias nos tempos de atuação do sistema de proteção de um sistema de distribuição. Para tanto, o sistema de armazenamento foi alocado em vinte barras do sistema elétrico, sendo analisados os impactos nos tempos de operação de dez dispositivos de proteção devido à falta do tipo *close-in*.

3. MOMESSO, A. E. C.; ASADA, E. N. Improving Recloser-Fuse Coordination With Self-Adaptive Adjustment. In: **XXIII Congresso Brasileiro de Automática (CBA)**, 2020.

Neste trabalho foram apresentados os resultados expostos na subseção 4.2.1 (Caso 1).

4. MOMESSO, A. E. C.; BERNARDES, W. M. S.; ASADA, E. N. Adaptive directional overcurrent protection considering stability constraint. **Electric Power Systems Research**, v. 181, p. 106190, 2020.

Neste artigo são empregados relés direcionais de sobrecorrente, com corrente de *pick-up* adaptativa por meio da lógica *fuzzy*, em um sistema de transmissão. Os tempos obtidos são comparados com relés convencionais coordenados por meio da otimização de enxame de partículas evolutiva. Com os resultados obtidos, é verificado qual metodologia acarreta num sistema elétrico estável durante as situações de faltas.

5. MOMESSO, A. E. C.; BARRA, P. H. A.; BARBALHO, P. I. N.; ASADA, E. N.; COURY, D. V.; VIEIRA, J. C. M.; OLESKOVICZ, M.; BICZKOWSKI, M. Impact

Analysis of a Transportable BESS on the Short-Circuit Behavior in a Distribution System. In: **2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)**, 2020.

Neste trabalho é estudado o impacto de um sistema de armazenamento de energia transportável via baterias nas correntes de curto-circuito de um sistema de distribuição. Para tanto, o sistema de armazenamento foi alocado em cada barra do sistema elétrico, sendo analisados os impactos nos valores das correntes de falta em todas as barras.

6. KUME, G. Y.; MOMESSO, A. E. C.; MONTEIRO, F. M. S.; ASADA, E. N. Impedance-based Fault Location Error Analysis in Distribution Network with Distributed Generation. In: **VIII Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)**, 2020.

Neste artigo é proposto uma ferramenta para a localização dos prováveis pontos de falta, baseada no método da impedância, em sistemas de distribuição com a presença de geradores distribuídos. Neste método é necessário a utilização de medidores de corrente e tensão na subestação e junto aos geradores. Como resultado, foi observado o impacto do nível de penetração da geração distribuída nos pontos de falta encontrados.

7. KUME, G. Y.; MOMESSO, A. E. C.; ASADA, E. N. Combined Impedance and Branch Current State Estimation Method for Fault Location in Electric Power Distribution Systems. In: **2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)**, 2020.

Este trabalho utiliza da estimação de estado para a redução da múltipla localização do ponto de falta em sistemas de distribuição. Primeiramente é utilizado do método da impedância para a localização dos prováveis pontos de falta e, posteriormente, usa-se a estimação de estado para determinar o ponto de maior probabilidade da ocorrência.

8. 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.

Este artigo emprega relés com ajuste adaptativo da corrente de *pick-up* no sistema de distribuição. Além disso, leva também em consideração a tensão medida pelo equipamento para o cálculo do tempo de atuação. Os resultados mostram a eficiência do dispositivo implementado, tendo em vista melhorar o tempo de atuação para diferentes cenários, resistências de faltas e potência do gerador distribuído.

9. MOMESSO, A. E. C.; BERNARDES, W. M. S. ; ASADA, E. N. Fuzzy-based Non-communicating Adaptive Overcurrent Relay. **IFAC-PAPERSONLINE**, v. 51, p. 315-320, 2018.

Neste trabalho é utilizado a lógica *fuzzy* de modo a modificar a corrente de *pick-up* do relé de sobrecorrente. Estudos foram realizados em um sistema de distribuição e os resultados foram comparados aos relés convencionais. Foi possível observar que o relé proposto conseguiu ser mais sensível que o relé convencional para resistências de falta mais elevadas, além de apresentar tempos de atuações mais rápidos.

Trabalhos de áreas afins:

1. MOMESSO, A. E. C.; BARRA, P. H. A.; CAMPOS, G. P.; BARBALHO, P. I. N.; OLESKOVICZ, M.; COURY, D. V.; ASADA, E. N.; VIEIRA JUNIOR, J. C. M.; ARIOLI, V. T.; HAX, G. R. T.; BICZKOWSKI, M. Análise Transitória da Conexão de um Sistema de Armazenamento de Energia Transportável em um Sistema de Distribuição. In: **XXV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, 2019.

Este artigo apresenta uma análise dos transitórios provenientes da conexão de um sistema de armazenamento de energia transportável via baterias de 1 MW/1 MWh no sistema de distribuição. As simulações englobam as taxas de carga e descarga; operação nos quatro quadrantes; proteção anti-ilhamento; contribuição do sistema para os curtos-circuitos; energização e desenergização súbita; e entrada e saída de blocos de cargas.

2. SOUZA, J. V.; MOMESSO, A. E. C. ; MONTEIRO, F. M. S. ; OTTO, R. B. ; ASADA, E. N. Intelligent Management of Battery System for Energy Arbitrage. In: **13th IEEE PowerTech 2019**, 2019, Milão. 13th IEEE PowerTech 2019, 2019.

Este trabalho utiliza do sistema *fuzzy* para controlar a carga e descarga de uma bateria com base no preço da energia. Foram realizados testes com dois sistemas *fuzzy* diferentes e o resultado foram comparados com a utilização do preço médio para a tomada de decisão. Como conclusão, foi possível observar que um sistema *fuzzy* mais genérico possibilita melhores resultados.