

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
ELÉTRICA**

**Fernando Guilherme Kaehler Guarda**

**METODOLOGIA HÍBRIDA PARA ALOCAÇÃO, COORDENAÇÃO,  
DIMENSIONAMENTO E ADEQUAÇÃO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO  
EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM  
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DIRETAMENTE ACOPLADA**

Santa Maria, RS, Brasil

2017

**Fernando Guilherme Kaehler Guarda**

**Metodologia Híbrida Para Alocação, Coordenação e Dimensionamento de Dispositivos de Proteção em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica com Geração Distribuída Diretamente Acoplada**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Elétrica**

**Orientador: Ghendy Cardoso Junior, Dr. Eng.**

Santa Maria, RS, Brasil

2017

**Fernando Guilherme Kaehler Guarda**

**Metodologia Híbrida Para Alocação, Coordenação e Dimensionamento de Dispositivos de Proteção em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica com Geração Distribuída Diretamente Acoplada**

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Elétrica**

Aprovado em 01 de fevereiro de 2017:

---

Ghendy Cardoso Junior, Dr. (UFSM)  
(Presidente/Orientador)

---

Gustavo Dorneles Ferreira, Dr. (UFRGS)

---

Eduardo Machado dos Santos, Dr. (UNIPAMPA)

---

Aécio de Lima Oliveira, Dr. (UFSM)

---

Adriano Peres de Moraes, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS

2017

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Guilherme Kaehler Guarda, Fernando  
METODOLOGIA HÍBRIDA PARA ALOCAÇÃO, COORDENAÇÃO,  
DIMENSIONAMENTO E ADEQUAÇÃO DO SISTEMA DE PROTEÇÃO EM  
SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM GERAÇÃO  
DISTRIBUÍDA DIRETAMENTE ACOPLADA / Fernando Guilherme  
Kaehler Guarda.- 2017.  
106 p.; 30 cm

Orientador: Ghendy Cardoso Junior  
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica, RS, 2017

1. Proteção de sistemas de distribuição 2. Geração  
distribuída 3. Limitadores de corrente de falta 4.  
Coordenação e seletividade da proteção I. Cardoso Junior,  
Ghendy II. Título.

---

© 2017

Todos os direitos autorais reservados a Fernando Guilherme Kaehler Guarda. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor. Endereço: R. das Hortências, 160, Bairro Patronato, Santa Maria, RS, 97020-400. Fone 55 991650428; End. Eletr.: fernandokg@gmail.com

---

Dedico esse trabalho aos meus pais, Rubem e Stela, meus heróis.

# Agradecimentos

Primeiramente, agradeço à Deus por tudo que me foi dado nessa jornada.

Agradeço principalmente meus pais, Stela e Rubem, que são meus heróis, meus pilares, responsáveis principais por qualquer sucesso obtido por mim. O que faço é pra dar orgulho à vocês.

Minha avó Celina, fonte de amor e conhecimento, minha segunda mãe, agradeço do fundo do coração.

À minha namorada Diéssica, por ser exemplo de esforço e perseverança, obrigado por me aguentar.

Meu orientador, Prof. Ghendy Cardoso Junior, por ter sido um guia e um exemplo desde a graduação.

Meus professores, que me inspiraram a escolher essa carreira.

À Luciana Kapelinsky e André Borniatti, que são profissionais e pessoas sensacionais, que me ajudaram muito a concluir esse trabalho.

Agradeço também aos amigos Aécio de Lima Oliveira e Nelson Knak Neto, pela amizade que eu espero que dure para sempre e pelas conversas, técnicas ou não.

Meus colegas de CEESP que tornaram essa jornada menos transitória, sempre auxiliando os raciocínios a entrar em regime permanente.

Meus amigos Felipe, Henrique, Lennon, Patrícia pela amizade e incentivo que sempre me deram.

Também meus amigos Lamarck, Eduardo, Carlos, Gustavo, Guilherme, TK, Ícaro, Israel pela amizade, xis, churrascos e diversão nonstop.

Ao meu amigo e mestre Gustavo Chagas Leitão, um exemplo de pessoa e de músico, agradeço pela orientação na busca da técnica guitarrística e pela amizade.

Minha querida banda Rust, Hekatelyne, Diego, Bruno e Rodrigo. Vocês são pessoas sensacionais e os nossos sons, comilanças e amizade contribuíram de uma maneira inacreditável pra esse trabalho.

Também agradeço meus amigos e professores Ptolomeu, Roger, Dion, Aline e Sofia que contribuíram significativamente para esse trabalho.

À Capes, que financiou esse trabalho.

Agradeço do fundo do coração à Universidade Federal de Santa Maria, minha segunda casa, que me proporcionou tantas experiências, além de uma formação de qualidade. Prometo que ainda vou voltar e devolver com juros tudo que recebi desta instituição.

*“Peace is a lie, there is only passion*

*Through passion I gain strength*

*Through strength, I gain power*

*Through power I gain victory*

*Through victory, my chains are broken*

*The Force shall free me.”*

*Sith Philosophy.*

# RESUMO

## **Metodologia Híbrida Para Alocação, Coordenação, Dimensionamento e Adequação do Sistema de Proteção em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica com Geração Distribuída Diretamente Acoplada**

AUTOR: Fernando Guilherme Kaehler Guarda

ORIENTADOR: GHENDY CARDOSO JUNIOR, Dr. Eng.

Este trabalho tem o intuito de alocar, dimensionar, coordenar e adequar o sistema de proteção em redes de distribuição de energia elétrica na presença de fontes de geração distribuída (GD) diretamente acopladas à rede. Atualmente, é possível observar o crescimento na inserção de fontes de GD em sistemas de distribuição, sendo isso incentivado por novas legislações e pela redução no custo de implantação dessas fontes, devido à crescente maturidade tecnológica alcançada. A geração dispersa de energia traz diversos benefícios na operação da rede elétrica, podendo-se citar a redução de perdas técnicas, manutenção de perfis de tensão, aumento da qualidade de energia, entre outros. Porém, esse incremento na penetração da GD nas redes elétricas tradicionais também traz problemas que devem ser considerados. Um sistema de distribuição passível à inserção de fontes de GD, possui dispositivos de proteção já alocados e sua coordenação determinada. A contribuição das fontes de GD para a corrente de falta altera a sensibilidade desses dispositivos, provocando diversas descoordenações e a necessidade de novos estudos de proteção. Esses problemas são tratados separadamente por pesquisadores, porém, são relacionados. Neste trabalho, buscou-se realizar a alocação de dispositivos de proteção e desenvolver uma solução para acomodar as fontes de GD. Primeiramente, é realizada a alocação, dimensionamento e coordenação dos dispositivos de proteção, visando a redução dos indicadores de continuidade responsáveis por avaliar quantitativamente a qualidade do serviço de energia elétrica. Aliado à isto, foi desenvolvido um método para reduzir a descoordenação entre dispositivos religadores e elos fusíveis na presença de GD. Para isso, foi considerada a instalação de Limitadores de Corrente de Falta (LCF), que são dispositivos que não causam interferência no sistema quando em funcionamento normal, porém, na ocorrência de um curto-circuito, inserem uma impedância considerável, limitando assim a contribuição da GD para a corrente de falta. O problema de alocação de dispositivos de proteção foi tratado utilizando algoritmo de enxame de partículas multiobjetivo, visando minimizar os indicadores de continuidade com sua prioridade definida pelo peso que cada um desses recebe do operador na função objetivo. Com as soluções obtidas, é considerada a inserção de fontes de GD no sistema. Então a alocação e dimensionamento de LCF é realizada para as melhores soluções obtidas de alocação de dispositivos de proteção. Para determinar essa alocação, o algoritmo de enxame de partículas multiobjetivo também foi utilizado, com o intuito de reduzir a diferença entre as correntes de falta com e sem GD, garantindo a seletividade entre elos fusíveis e a coordenação religador – elo fusível, bem como reduzir a dimensão do LCF (minimização do custo). Complementando o método, a filosofia operacional dos religadores é verificada, buscando evitar a contribuição da GD para faltas durante a operação rápida deste. O método proposto foi testado em dois sistemas IEEE, apresentando soluções de qualidade tanto na alocação dos dispositivos de proteção quanto na eficiência operacional do sistema de proteção em redes de distribuição com geração distribuída.

**Palavras chave:** Proteção de Sistemas de distribuição; Alocação de dispositivos de proteção; Coordenação de dispositivos de proteção; Confiabilidade de sistemas de distribuição; Geração Distribuída.



# ABSTRACT

## **Hybrid Methodology for Protection System Placement, Sizing, Coordination and Adequation in Electric Distribution Systems with Directly Coupled Distributed Generation**

**AUTHOR:** Fernando Guilherme Kaehler Guarda  
**COORDINATOR:** GHENDY CARDOSO JUNIOR, Dr. Eng.

This work aims to allocate, size and coordinate protective devices in electric power systems with directly coupled distributed generation and also to adequate protection systems to accommodate these sources. Currently, it is possible to observe distributed generation penetration growth in distribution systems, being encouraged by new laws and implementation costs reduction, the last one due to technological maturity. Dispersed generation brings several benefits in electric networks operation such as: reduction of technical losses, voltage profiles maintenance, increase in energy quality, etc. However, this rise in distributed generation penetration in traditional distribution systems also causes important issues that must be considered. Distribution systems candidate to receive distributed generation have their protection systems already sized and coordinated. Distributed generation contribution alters the devices sensibility, causing miscoordination and the need for new protection studies. These problems are separately treated by authors, however, they are connected. In this work, the objective is to determine protective devices allocation and develop a solution to accommodate distribution generation. Firstly, the allocation, sizing and coordination of protective device is carried out, aiming to reduce reliability indices. Else, it was developed a method to reduce recloser - fuse miscoordination in the presence of distributed generation. To solve the miscoordination problem, Fault Current Limiters are sized and placed. These are inert devices in normal operation, but insert a high impedance in series with a feeder in a short circuit situation, limiting distributed generation contribution for a fault. The protective devices allocation problem is treated using a multiobjective particle swarm algorithm, aiming to reduce reliability indices, which priority is defined by the weight associated with each index. With the optimal protective devices placement established, distributed generation penetration is considered. Then, fault current limiters allocation and sizing is carried out to the best solutions of the protective devices allocation problem. To determine fault current limiters placement, a multiobjective particle swarm algorithm is also applied, aiming to reduce current differences due to distributed generation penetration, maintaining fuse cutout selectivity and also minimize fault current limiter size. The proposed method was tested in two IEEE test systems, presenting quality solutions for protective devices placement and also in adequating these systems to receive distributed generation.

**Keywords:** Distribution systems protection; Protective devices placement; Protective devices coordination; distribution systems reliability; Distributed Generation.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1– Indicadores de continuidade apurados.....	17
Tabela 1.2 – Compensações devido à penalizações para valores de DIC e FIC.....	17
Tabela 2.1 – Matriz Topologia.....	35
Tabela 2.2 – Matriz de parâmetros.....	35
Tabela 2.3 – Matriz Dispositivos.....	38
Tabela 2.4 – Representação das partículas em um enxame.....	42
Tabela 2.5 – Matriz Dimensionamento_Fase.....	50
Tabela 2.6 – Matriz Dimensionamento_Neutro.....	51
Tabela 4.1 – Alocação dos dispositivos de proteção.....	77
Tabela 4.2 – Indicadores de continuidade obtidos para os sistemas teste considerados.....	78
Tabela 4.3 – Tempos médios de reparo e taxas de falha consideradas nos sistemas teste.....	78
Tabela 4.4 – Dados dos geradores distribuídos.....	79
Tabela 4.5 – Comparação dos resultados da busca exaustiva e do método proposto para o sistema IEEE 34 nós.....	81
Tabela 4.6 – Filosofia de proteção dos religadores para o sistema teste IEEE 34 nós, considerando faltas em pontos distintos (metodologia desenvolvida).....	82
Tabela 4.7 – Comparação dos resultados da busca exaustiva e do método proposto para o sistema IEEE 37 nós.....	84
Tabela 4.8 – Filosofia de proteção do religador para o sistema teste IEEE 37 nós, considerando faltas em pontos distintos (metodologia desenvolvida).....	86
Tabela 4.9 – Comparação de seletividade entre elos fusíveis no sistema IEEE 37 nós.....	87
Tabela 4.10 – Tempos de operação dos dispositivos no sistema IEEE 37 nós para um curto-circuito no ponto 838 considerando GD1.....	87
Tabela 4.11 – Tempos de operação dos dispositivos no sistema IEEE 37 nós para um curto-circuito no ponto 740 considerando GD2.....	88

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fluxograma do método de alocação dos dispositivos de proteção.....	33
Figura 2.2 – Sistema de distribuição genérico.....	34
Figura 2.3 – Grafo representativo do sistema de distribuição genérico.....	34
Figura 2.4 – Caminho mínimos em um sistema de distribuição.....	37
Figura 2.5 – Representação gráfica do PSO.....	41
Figura 2.6 – Alocação obrigatória de religador considerando cargas importantes.....	45
Figura 2.7 – Alocação obrigatória de religadores considerando a taxa de falha temporária de alimentadores secundários e ramais.....	46
Figura 2.8 – Fluxograma da verificação da seletividade e correção de elos fusíveis.....	54
Figura 2.9 – Seletividade Relé – Elo fusível.....	55
Figura 2.10 – Diferença entre curvas na coordenação religador – religador.....	57
Figura 2.11 – Zona de coordenação entre religador e elo fusível.....	59
Figura 3.1 – Limitador de corrente de falta de estado sólido.....	63
Figura 3.2 – Curva de histerese do limitador de corrente magnético.....	64
Figura 3.3 – Coordenação entre dispositivos de proteção.....	65
Figura 3.4 – Operação seletiva dos dispositivos de proteção.....	66
Figura 3.5 – Configuração tradicional do sistema de distribuição radial.....	66
Figura 3.6 – Contribuições para a corrente de falta.....	67
Figura 3.7 – Má operação do elo fusível devido à contribuição da GD.....	68
Figura 3.8 – Fluxograma do algoritmo de enxame de partículas multiobjetivo.....	73
Figura 3.9 – Contribuição para corrente de falta da subestação e GD localizada à montante do religador.....	74
Figura 4.1 – Sistema Teste IEEE 34 nós.....	76
Figura 4.2 – Sistema Teste IEEE 37 nós.....	77
Figura 4.3 – Possibilidades de combinações de fontes de GD conectadas consideradas na busca exaustiva.....	80
Figura 4.4 – Resultado da busca exaustiva para a alocação de limitadores de corrente para o sistema IEEE 34 nós.....	81
Figura 4.5 – Alocação de limitadores de falta obtida pela busca exaustiva para o sistema IEEE 37 nós.....	83
Figura 4.6 – Coordenograma para um curto-circuito no ponto 838 do sistema IEEE 34 nós.....	87
Figura 4.7 – Coordenograma de um curto-circuito no ponto 740 do sistema IEEE 37 nós.....	88
Figura 4.8 – Coordenograma para o caso A.....	89
Figura 4.9 – Coordenograma para o caso B.....	89
Figura 4.10 – Coordenograma para o caso C.....	90
Figura 4.11 – Coordenograma para o caso D.....	90
Figura 4.12 – Coordenograma para o caso E.....	91
Figura 4.13 – Coordenograma para o caso F.....	91
Figura 4.14 – Coordenograma para o caso G.....	92
Figura 4.15 – Coordenograma para o caso H.....	92
Figura 4.16 – Coordenograma para o caso I.....	93

## LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

AG – Algoritmo Genético

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

DEC – Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora

DIC – Duração individual de interrupção por unidade consumidora

DMIC – Duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora

DOU – Diário Oficial da União

ECOST – Expected Cost (Custo esperado)

END – Energia não distribuída

ENS – Energia não suprida

FEC – Frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora

FIC – Frequência de interrupção individual por unidade consumidora

GD – Geração Distribuída

LCF – Limitador de corrente de falta

LCFES – Limitador de corrente de falta de estado sólido

MAIFI – Frequência média de interrupções temporárias

*MAIFI<sub>E</sub>*: Eventos causadores de interrupções temporárias

MINLP – Modelo de programação não-linear inteiro misto

MLE – Matriz Lógico-estrutural

MME – Ministério de Minas e Energia

PRODIST – Procedimentos de distribuição

PSO – *Particle Swarm Optimization* (Otimização por enxame de partículas)

RLCF – Limitador de corrente de falta resistivo

ILCF – Limitador de corrente de falta indutivo

CLCF – Limitador de corrente de falta capacitivo

SAIDI – *System average interruption duration index* (Duração equivalente de interrupções - DEC)

SAIFI – *System average interruption duration index* (Frequência equivalente de interrupções - FEC)

SDEE – Sistemas de distribuição de energia elétrica

TC – Transformador de corrente

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	15
1.2	INTRODUÇÃO	15
1.3	OBJETIVOS DO TRABALHO	19
1.4	MOTIVAÇÃO	19
1.5	ESTADO-DA-ARTE	20
1.5.1	<i>Alocação de dispositivos de proteção em SDEE</i>	20
1.5.2	<i>Proteção de SDEE com GD</i>	25
1.5.3	<i>Descoordenação religador – elo fusível em SDEE</i>	26
1.5.4	<i>Alocação de limitadores de corrente de falta em SDEE com GD</i>	28
1.5.5	<i>Considerações acerca do estado-da-arte</i>	29
1.6	CONTRIBUIÇÕES DA TESE	30
1.7	ESTRUTURA DO TRABALHO	30
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA HÍBRIDA PARA ALOCAÇÃO DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO</b>	<b>32</b>
2.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	32
2.2	VISÃO GERAL	32
2.3	DADOS DE ENTRADA	34
2.4	ALOCAÇÃO HEURÍSTICA DE ELOS FUSÍVEIS	39
2.5	ALGORITMO DE ENXAME DE PARTÍCULAS ( <i>PARTICLE SWARM OPTIMIZATION</i> ) E ALOCAÇÃO DE DISPOSITIVOS DE RELIGADORES	39
2.6	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO	42
2.6.1	<i>Restrições do problema</i>	43
2.6.2	<i>Dimensionamento e coordenação dos dispositivos de proteção</i>	46
2.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
<b>3</b>	<b>MÉTODO PARA REDUÇÃO DA INFLUÊNCIA DE FONTES DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA COORDENAÇÃO RELIGADOR – ELO FUSÍVEL</b>	<b>60</b>
3.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	60
3.2	INFLUÊNCIA DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	60
3.2.1	<i>Influência da geração distribuída na coordenação de dispositivos de proteção</i>	61
3.2.2	<i>Limitadores de corrente de falta</i>	61
3.2.2.1	<i>Limitadores de corrente de falta de estado sólido</i>	62
3.2.2.2	<i>Limitadores de corrente de falta supercondutores</i>	63
3.2.2.3	<i>Limitadores de corrente de falta magnéticos</i>	64

3.3	PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE LIMITADORES DE CORRENTE DE FALTA PARA REDUÇÃO DA DESCOORDENAÇÃO RELIGADOR – ELO FUSÍVEL EM SDEE COM GD	65
3.4	MÉTODO PARA ALOCAÇÃO DE LIMITADORES DE CORRENTE DE FALTA USANDO ALGORITMO DE ENXAME DE PARTÍCULAS MULTIOBJETIVO	68
3.4.1	<i>Método de solução: Algoritmo de enxame de partículas multiobjetivo</i>	70
3.4.2	<i>Filosofia operacional do religador</i>	74
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>76</b>
4.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	76
4.2	ALOCAÇÃO DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO	76
4.3	REDUÇÃO DA DESCOORDENAÇÃO RELIGADOR – ELO FUSÍVEL EM SDEE COM GD	78
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>94</b>
5.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	94
5.2	MÉTODO PARA ALOCAÇÃO DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO	94
5.3	MÉTODO PARA REDUÇÃO DA INFLUÊNCIA DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA COORDENAÇÃO RELIGADOR – ELO FUSÍVEL	95
5.4	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	96
5.5	TRABALHOS PUBLICADOS	<b>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</b>
5.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>97</b>

## **1 INTRODUÇÃO**

### **1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS**

Neste capítulo são apresentadas as considerações relativas à alocação de dispositivos de proteção em sistemas de distribuição de energia elétrica (SDEE) e a influência de fontes de geração distribuída (GD) na operação destes. Os objetivos desse trabalho também são apresentados, bem como a justificativa para o seu desenvolvimento. Será também realizada uma revisão e análise do estado-da-arte de técnicas utilizadas na solução dos problemas apresentado pela alocação de dispositivos de proteção e pela presença de fontes de GD em sistemas de distribuição.

### **1.2 INTRODUÇÃO**

Com o crescimento econômico brasileiro, a demanda energética tem aumentado significativamente, exigindo fornecimento de energia elétrica confiável e de qualidade. Com isso em mente, os investimentos no desenvolvimento de métodos para o aumento da confiabilidade do serviço de distribuição de energia elétrica adquiriram grande importância para as concessionárias de energia.

Com a privatização destas, ocorrida nos anos 90, houve uma desverticalização no setor elétrico, o que separou as atividades de geração, transmissão e distribuição (ROSA et al., 1998). A partir de então os sistemas de distribuição passaram a ter importância fundamental, pois foram os setores com maior abertura à iniciativa privada.

Devido à essa abertura ao capital privado, houve uma preocupação crescente com a qualidade do serviço de energia elétrica ao consumidor, seja pela imagem da concessionária perante aos consumidores, seja pela pressão imposta por políticas de regulamentação, que acarretam em multas e não faturamento de energia quando da ocorrência de interrupções.

No ano de 1996 foi sancionado o ato legal responsável pela criação do novo órgão regulador do setor de energia elétrica: a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, instituía a ANEEL, definindo-a como autarquia sob regime especial, vinculada ao Ministério das Minas e Energia (MME), com objetivo de regular

e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização da energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do governo federal.

A ANEEL foi efetivamente constituída em 1997, com a publicação do decreto 2.335, de 6 de outubro de 1997, e com a Portaria do MME nº 349, de 28 de novembro de 1997. O decreto estabelece as diretrizes da ANEEL, suas atribuições e estrutura básica, bem como o princípio da descentralização que permite à agência estender sua ação aos diversos pontos do Brasil.

A agência foi criada com a missão de proporcionar condições favoráveis para que o mercado de energia elétrica se desenvolva com equilíbrio entre agentes e em benefício da sociedade. Além das funções de fiscalização e regulação, a ANEEL é responsável por mediar os conflitos de interesses entre os agentes do setor elétrico e entre estes e os consumidores, como atender as reclamações das partes, conceder, permitir e autorizar instalações e serviços de energia, garantir tarifas justas, zelar pela qualidade do serviço, exigir investimentos, estimular a competição entre os operadores e assegurar a universalização dos serviços.

Em 1999 teve início o processo de elaboração do que viria a ser o conjunto de normas que disciplinam o relacionamento entre as concessionárias de energia elétrica e os demais agentes do sistema, os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST. Aprovado na 49ª reunião pública ordinária da diretoria da ANEEL em 2008, através da Resolução Normativa nº 345, de 16 de dezembro de 2008, foi publicada no Diário Oficial da União – DOU em 31 de dezembro de 2008.

A elaboração do PRODIST foi baseada nos princípios de modicidade tarifária, direitos e deveres equilibrados, função da distribuição de energia, tratamento igualitário para usuários da rede e um sistema de informações sistemáticas e permanentes de modo a auxiliar nos processos de regulação, fiscalização e mediação da ANEEL.

No módulo 8 do PRODIST são estabelecidos os procedimentos relativos à qualidade de energia, abordando a qualidade do serviço e também do produto. Considerando a qualidade dos serviços prestados, o módulo 8 estabelece a metodologia para a apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades das concessionárias.

Para se adequar às exigências impostas pela ANEEL no PRODIST, as concessionárias têm investido cada vez mais em pesquisas de métodos para redução de interrupções nos seus sistemas. Essas pesquisas envolvem a redução dos indicadores de continuidade, sendo esses responsáveis por medir a duração equivalente das interrupções por unidade consumidora



(DEC), a frequência equivalente das interrupções por unidade consumidora (FEC) e, pelo lado da concessionária, a energia não suprida devido à interrupções (ENS), sendo esta a única não regulamentada pela ANEEL, mas de extrema importância para as empresas do ponto de vista econômico.

Como exemplo real da crescente necessidade de investimento na continuidade de serviço, a Tabela 1.1 mostra 4 subestações pertencentes ao grupo RGE, operantes na cidade de Santa Maria – RS. Nota-se que nos conjuntos SANTA MARIA 1, SANTA MARIA 2 e SANTA MARIA 4 a duração das interrupções extrapolou o limite estabelecido no ano de 2015. Já a frequência das interrupções ultrapassou o limite em SANTA MARIA 2. O desempenho dessas subestações acarretou no custo de compensações a serem pagas à ANEEL, mostrada na Tabela 1.2. Os dados mostrados são referentes à concessionária AES Sul, adquirida pela CPFL em 2016, vindo a se tornar RGE Sul.

Tabela 1.1- Indicadores de continuidade apurados

<b>Indicadores de continuidade por conjunto</b>					
<b>AES-sul - ano (2015)</b>					
<b>Conjunto</b>	<b>Nº de consumidores</b>	<b>DEC apurado</b>	<b>DEC limite</b>	<b>FEC apurado</b>	<b>FEC limite</b>
Santa Maria 1	23.584	13,48	9,00	7,38	10,00
Santa Maria 2	22.561	14,48	11,00	12,96	11,00
Santa Maria 4	40.762	17,64	10,00	10,92	11,00
Santa Maria 5	32.696	7,93	8,00	7,76	8,00
Total de conjuntos: 50	<b>Consumidores: 1.299.154</b>				

Fonte: ANEEL (2017)

Tabela 1.2 - Compensações da concessionária devido à penalizações para valores de DIC e FIC

<b>Compensações</b>	<b>Mensais</b>	<b>Trimestrais</b>	<b>Anuais</b>
Quantidade das compensações	1.603.999	405.569	289.421
Valor das compensações (R\$)	14.701.611,33	2.378.589,78	2.530.694,09

Fonte: ANEEL (2017)

A importância na alocação dos dispositivos de proteção está na garantia de uma maior continuidade no fornecimento de energia elétrica e também confiabilidade da rede. Os SDEE que contam com uma alocação eficiente destes dispositivos são capazes de reduzir o efeito causado por defeitos, isolando o trecho sob falta, afetando o menor número de consumidores. Para restringir o trecho desenergizado, vários critérios devem ser considerados para a instalação da proteção, como importância de ramais, locais de acesso limitado, limites de coordenação entre dispositivos, etc. Portanto, a alocação otimizada de dispositivos de proteção e sua coordenação é de suma importância para a redução do custo das concessionárias em relação à penalizações devido à interrupções de energia elétrica (KAGAN et al., 2005).

Com o rápido crescimento na demanda de energia, empresas de energia vêm buscando uma maior capacidade de geração de energia elétrica. Entretanto, diversas questões dificultam a adição de fontes de geração de energia elétrica centralizadas e linhas de transmissão. Portanto, novas tecnologias baseadas em geração distribuída estão se tornando mais comuns como geradores de energia alternativos. O incentivo para a utilização de fontes de geração distribuída permite que a geração seja instalada próximo às cargas. É esperado que a geração distribuída de energia alcance 20% da geração total de um sistema até o ano de 2020. Entretanto, por esse tempo, o nível de penetração de geração distribuída deve ser maior em muitos países que contam com incentivos governamentais (GÓMEZ e MORCOS, 2005).

As fontes de geração distribuída trazem benefícios tanto para concessionárias de energia e consumidores, visto que são capazes de reduzir perdas técnicas, melhoram os perfis de tensão de alimentadores e reduzem os custos de transmissão e distribuição devido à sua localização próxima às cargas.

Os sistemas de distribuição contam com um sistema de proteção composto por relés, religadores e elos fusíveis. Esses dispositivos encontram-se alocados, dimensionados e coordenados de acordo com uma determinada configuração do sistema de proteção. Com a penetração de fontes de geração distribuída, esses parâmetros da proteção sofrem seus efeitos. A contribuição extra e bidirecionalidade do fluxo de corrente causada pelas fontes de geração distribuída causam a má operação dos dispositivos. A substituição de diversos equipamentos de proteção e alteração da coordenação destes torna-se inviável tanto economicamente quanto tecnicamente. Isso faz com que sejam desenvolvidas pesquisas por métodos que buscam reduzir o impacto da inserção das fontes de GD no sistema de proteção. Esses métodos envolvem alterações de parâmetros *online* em tempo real para religadores, substituição de equipamentos e desconexão de todas as fontes de GD do sistema no evento de uma falta. Porém, além de

economicamente onerosos, os autores (ABDEL-GHANY et. al, 2015) buscam principalmente minimizar a contribuição da GD, não levando em consideração os efeitos provocados por essa durante a operação dos equipamentos de proteção.

### 1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo geral desse trabalho é desenvolver uma metodologia para aliar a alocação de dispositivos de proteção e a solução do problema de descoordenação religador – elo fusível quando há inserção de fontes de GD diretamente acopladas em sistemas de distribuição de energia elétrica.

Como objetivos específicos, pode-se citar o desenvolvimento de uma metodologia capaz de:

- Alocar dispositivos de proteção buscando minimizar indicadores de continuidade;
- Automatizar a coordenação e dimensionamento dos dispositivos de proteção alocados;
- Alocar limitadores de corrente de falta e retificar a filosofia de operação de religadores para adequar o sistema de proteção à GD, levando em consideração coordenação e seletividade entre os dispositivos.

### 1.4 MOTIVAÇÃO

A correta operação do sistema de proteção em um SDEE é extremamente importante, pois a qualidade do serviço de distribuição de energia elétrica é monitorada e tem um alto padrão de exigência pela ANEEL.

A alocação de dispositivos de proteção no SDEE é realizada considerando a operação radial e fluxo unidirecional da corrente. Porém, com o crescimento na utilização de fontes de GD, a coordenação dos dispositivos de proteção é comprometida. Dessa forma, fontes de GD são inseridas em SDEE que apresentam a alocação de dispositivos de proteção já determinada para um cenário de operação, é necessário o desenvolvimento de uma metodologia para reduzir a influência da penetração de GD nos dispositivos de proteção já alocados.

As técnicas empregadas na literatura envolvem a desconexão das fontes de GD na ocasião de uma falta (BRAHMA e GIRGIS, 2002) (BRAHMA e GIRGIS, 2004), a substituição

dos equipamentos de proteção para acomodar a contribuição destes para a corrente de curto-circuito (BRAHMA e GIRGIS, 2002) e também a completa realocação de dispositivos de proteção quando da inserção dessas fontes (CHAITUSANEY e YOKOHAMA, 2008).

A solução encontrada por diversos autores através da inserção de limitadores de corrente de falta mostrou-se com erros importantes de concepção, visto que os métodos desenvolvidos buscam apenas reduzir a corrente de falta até a zona de coordenação delimitada pelas curvas tempo x corrente de religadores e elos fusíveis (CHAITUSANEY e YOKOHAMA, 2008) (KIM et al., 2012) (LIM et. al., 2012). Esses autores não consideram a continuidade de contribuição da GD para faltas temporárias após a operação instantânea do religador. Viu-se então necessário o desenvolvimento de um método para solucionar o problema da descoordenação religador – elo fusível considerando a continuidade da contribuição da GD e seus efeitos na coordenação e seletividade dos dispositivos de proteção.

## 1.5 ESTADO-DA-ARTE

Os trabalhos acerca do problema de alocação de dispositivos de proteção envolvem métodos para determinação dos melhores locais para instalação de dispositivos de proteção com o intuito de reduzir o número e a duração de interrupções de energia elétrica. Esses métodos utilizam diversas metaheurísticas para determinação dos melhores locais para instalação desses dispositivos, utilizando os indicadores de continuidade como objetivo (BILLINTON e JONNAVITULA, 1996) (CELLI e PILLO, 1999) (FERREIRA, 2009) (SILVA et al., 2004) (SOUDI e TOMSOVIC, 1998).

Também foram desenvolvidos métodos buscando solucionar o problema da inserção de fontes de GD em SDEE. Considerando a evidência cada vez maior da GD, a inserção dessas em sistemas de distribuição é um problema atual e de extrema importância. A inserção de GD em sistemas de distribuição causa efeitos negativos nos sistemas de proteção, necessitando a retificação da coordenação dos dispositivos ou a substituição desses.

### 1.5.1 Alocação de dispositivos de proteção em SDEE

Em (BILLINTON E JONNAVITHULA, 1996) é apresentada uma formulação para a alocação de chaves de manobra levando em consideração interrupções, manutenção e custos de investimentos. O problema apresentado possui uma função objetivo não linear e não-

diferenciável. Nesse trabalho foi utilizada a técnica de otimização recozimento simulado (*Simulated Annealing*) para determinar o número de chaves a serem instaladas e sua respectiva alocação. A solução apresentada pelos autores é adequada para sistemas de distribuição de grande porte.

Uma alternativa apresentada por Celli e Pillo (1999) foi a utilização do princípio da otimalidade de Bellmann em conjunto com técnicas que visam diminuir o esforço computacional na resolução do problema da alocação de chaves de manobra automáticas, com capacidade para diagnóstico de faltas e reconfiguração automática do sistema, tanto radial quanto malhado. O objetivo específico foi realizar a minimização da função objetivo tendo como guia o indicador de confiabilidade que informa o custo da interrupção, que é definido pelo custo da energia não fornecida devido à ocorrência de interrupções. A formulação do problema considerou: tempos de restabelecimento, taxas de faltas no alimentador, custo da energia, comprimento de cada seção e cargas instaladas. A metodologia consiste na inserção em sequência de chaves de manobra automáticas na rede. Assim, se o valor resultante da função objetivo fosse o menor custo de instalação, essa chave seria alocada em no respectivo ponto.

Em Levitin, Mazal-Tol e Elmakis (1994) são propostas duas metodologias para a alocação ótima de chaves de manobra com o objetivo de minimizar os indicadores SAIDI (*System Average Interruption Index*) e também a ENS (energia não suprida). Na primeira metodologia, busca-se estabelecer os pontos de instalação das chaves de manobra no alimentador, considerando a existência de chaves para interligação com outros alimentadores em posições predefinidas. Na segunda metodologia, é realizada simultaneamente a alocação das chaves de manobra e das chaves para interligação simultaneamente ao longo do alimentador. As funções objetivo envolvem o tempo de localização do defeito, chaveamento, reparo, taxas de faltas e a carga instalada em cada trecho. A limitação do número de chaves a serem alocadas foi uma restrição econômica da metodologia. Para a solução do problema foi utilizado um algoritmo genético modificado, que utiliza operadores genéticos adaptados para gerar indivíduos plausíveis.

Já em Toune et al. (1998) foi proposta a utilização de uma Busca Tabu Reativa (*Reactive Tabu Search*) para alocação das chaves de manobra. Neste trabalho, o principal intuito foi efetuar a distribuição da capacidade de reserva de cada ponto da subestação entre os trechos a serem restabelecidos, e assim, maximizar a tensão nos pontos da rede. As restrições consideradas no trabalho tinham relação com a manutenção da configuração radial dos alimentadores, capacidade das subestações, máxima queda de tensão e corrente máxima

admissível nos condutores. Busca Tabu é uma metaheurística que aplica uma busca norteadada por regras proibitivas, e algoritmos básicos de busca local. Ela depende de procedimentos passados para determinar os procedimentos presentes da busca. A Busca Tabu Reativa adiciona uma capacidade de variação dinâmica de alguns parâmetros de controle do algoritmo, possibilitando aumentar ou diversificar a exploração do espaço de busca conforme o comportamento das soluções.

Em Soudi e Tomsovic (1997) são expostas as práticas empregadas pelas concessionárias na alocação dos dispositivos de proteção. Considerando taxas de faltas permanentes e temporárias, carga e número de consumidores por seção do alimentador, foi proposta a utilização de Programação Não-Linear Binária para otimizar a confiabilidade no sistema, definindo a quantidade e os tipos de dispositivos de proteção a serem alocados em locais específicos da rede. O objetivo dessa metodologia foi minimizar os índices de continuidade de fornecimento SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*). Outra abordagem foi utilizada para minimizar os custos referentes à inserção dos dispositivos de proteção, de modo que os indicadores permaneçam abaixo de valores predeterminados.

Já em Soudi e Tomsovic (2001) foi agregada à metodologia desenvolvida anteriormente a avaliação da possibilidade de utilização do esquema de proteção coordenado ou seletivo entre dispositivos religadores e fusíveis. Nessa metodologia primeiramente é estabelecida a minimização dos índices SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*) e ASIFI (*Average Interruption Frequency Index*) através de processos independentes de otimização. Os resultados numéricos obtidos foram utilizados como restrições em um algoritmo que utiliza Programação por Metas (*Goal Programming*), realizando a minimização simultânea de ambos indicadores. Na outra formulação, é adicionado o método de Programação Nebulosa (*Fuzzy*) ao método anterior de Programação por Metas. Então, as restrições e objetivos foram formulados como funções de pertinência dos conjuntos nebulosos, permitindo assim a medição da variação de cada objetivo em relação aos valores mínimos dos indicadores, que foram definidos pelos processos de otimização anteriores. A partir do melhor resultado, foi procurado estabelecer um equilíbrio ótimo entre a diminuição do SAIFI e o aumento do MAIFI (*Momentary Average Interruption Frequency Index*), buscando definir os religadores nos quais seria habilitada a curva rápida de operação, caracterizando um esquema de proteção coordenado.

Silva, Pereira e Mantovani (2004) propuseram um modelo de programação não-linear inteiro misto (MINLP), com variáveis reais e binárias para o problema de alocação de chaves seccionadoras e dispositivos de proteção em setores estratégicos, buscando a minimização de

índices de continuidade e o consequente aumento do faturamento de energia e também adequando o sistema de distribuição aos critérios das agências regulamentadoras. Essa alocação permite aos setores em contingência serem isolados e reparados, remanejando cargas para alimentadores adjacentes. A técnica de solução utilizada foram algoritmos genéticos desenvolvido explorando as características físicas do problema. O algoritmo desenvolvido utiliza uma representação binária para indicar a instalação (0) ou a não instalação (1) de dispositivo de proteção em pontos predefinidos do sistema, sendo que há a limitação de 29 pontos candidatos.

Silva, Pereira e Mantovani também desenvolveram em 2005 um método para a alocação ótima de dispositivos de proteção e chaves seccionadoras durante o estágio de planejamento da rede. Para determinação desses locais ótimos o problema foi modelado como um modelo de programação não linear inteiro misto, sendo utilizada a busca tabu reativa para a solução. A função objetivo busca a minimização dos custos fixos de alocação e realocação dos dispositivos de proteção e chaves seccionadoras, a redução dos custos associados à atuação de dispositivos de proteção e consequente isolamento da falta e também os custos de restauração do serviço.

Campitelli et al. (2006) desenvolveu um sistema inteligente e interativo para a alocação otimizada de dispositivos de proteção. O algoritmo proposto envolve também estudos de seletividade e coordenação dos dispositivos de proteção contra sobrecorrente em alimentadores aéreos e radiais. É utilizada nesse trabalho uma base de conhecimentos provinda das normas técnicas de concessionárias de energia elétrica e também da experiência de engenheiros do setor de planejamento e projetos das mesmas. A base de dados é composta pelas curvas de tempo inverso e conjuntos de ajustes dos diferentes tipos de dispositivos de proteção. É possível a obtenção dos pontos de instalação dos dispositivos de proteção da forma heurística, utilizando a experiência dos engenheiros ou da forma otimizada. Na alocação otimizada o problema é modelado como um problema de programação não linear inteiro misto, sendo resolvido através de algoritmos genéticos (AG), onde o objetivo é apenas minimizar a energia não fornecida devido à atuação do sistema de proteção.

Bernardon et al. (2010) propuseram um método para alocação de chaves seccionadoras controladas remotamente, utilizando lógica nebulosa para a tomada de decisão multicriterial. A alocação otimizada dessas chaves contribui eficientemente na detecção de faltas, isolamento das mesmas e transferências de carga. O impacto dessa alocação na confiabilidade dos sistemas de distribuição é a melhora dos índices de continuidade SAIDI, SAIFI e ENS. O cálculo desses índices é feito através da Matriz Lógico-Estrutural (MLE), onde são consideradas as taxas de

falha ( $\lambda$ ) e os tempos médios de restabelecimento, isolamento e transferência para cada dispositivo. A determinação dos locais ótimos para instalação das chaves envolve o cálculo dos indicadores de continuidade diversas vezes, com o intuito de determinar a redução dos mesmos. Porém isso é tornado simples, pois o que é alterado são as células da MLE que são afetadas pela inserção das chaves. Os resultados apresentados demonstram que o método não apenas minimiza as funções objetivos consideradas, bem como reduz a necessidade de deslocamento de equipes de campo das empresas concessionárias de energia.

Ferreira (2009) considera todos os aspectos da confiabilidade, incluindo interrupções temporárias. A otimização multiobjetivo proposta busca minimizar SAIFI, SAIDI e  $MAIFI_E$  (*Momentary Average Interruption Event Frequency Index*).  $MAIFI_E$  é o índice que representa a frequência média da ocorrência de eventos causadores de interrupções temporárias, sendo excluídos eventos que precedem o bloqueio do dispositivo de proteção. Isso é alcançado considerando a alocação ótima dos dispositivos de proteção e chaves seccionadoras, bem como o tipo de filosofia de proteção aplicado, *fuse saving* ou *fuse blowing*. As restrições do problema representam limitações técnicas e econômicas, tais como os custos de instalação e operação dos dispositivos de proteção e chaves seccionadoras, bem como a topologia do sistema e a coordenação entre os dispositivos de proteção. As funções objetivo do problema são lineares, descontínuas e não diferenciáveis, causando dificuldade na aplicação de técnicas tradicionais de programação lineares e não lineares. Nesse trabalho foi empregado o *Nondominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA –II), que consiste em um algoritmo capaz de realizar a busca de várias soluções Pareto-ótimas em paralelo.

Golestani e Tadayon, (2011) buscam uma melhora de confiabilidade e a redução de custos em sistemas de distribuição na presença de geração distribuída. Isso é realizado através de uma abordagem em três estágios inspirada em uma versão discreta de um algoritmo de otimização por enxame de partículas para minimizar o número ótimo e a localização de dois tipos de dispositivos (chaves seccionadoras e disjuntores) em sistemas de distribuição radiais. É realizado um pré-processamento através de AG's para a geração da população inicial, melhorando o algoritmo de enxame de partículas e acelerando o processo de otimização. A função objetivo busca minimizar o custo esperado devido a interrupções (ECOST – *Expected Energy Cost*), para fins de comparação com outros trabalhos. Essa função responde aos efeitos da topologia do sistema, duração das interrupções, variações de carga e falhas aleatórias de componentes.



### **1.5.2 Proteção de SDEE com GD**

A inserção de fontes de GD em SDEE causa preocupação devido ao projeto original dos sistemas de proteção ser realizado considerando determinados valores de curto-circuito e sentido unidirecional do fluxo de corrente elétrica. Com a penetração da GD, esses valores de curto-circuito sofrem alterações, bem como o fluxo da corrente elétrica, afetando assim a coordenação entre dispositivos de proteção. Porém, a evolução do conceito de *Smart Grid* traz à realidade a necessidade de adaptação dos sistemas de proteção para a penetração da GD.

Diversos trabalhos são encontrados na literatura onde autores buscam solucionar ou reduzir os efeitos negativos da inserção de fontes de GD no sistema de proteção (HADJSAID et al., 1999) (POPOVIC et al., 2003) (PREGELJ et al., 2006) (PHOLBORISUT et al., 2011) (TUITEMWONG e PREMRUDEEPREECHACHARN, 2011) (ABDEL-GHANY et al., 2015). No geral, são utilizadas técnicas de inteligência computacional que buscam realizar alterações físicas nos sistemas sob influência da GD para acomodar essas fontes. Essa mesma inteligência computacional também é utilizada para realizar alterações nos ajustes dos dispositivos de proteção e também para a mudança dos locais de instalação desses dispositivos.

Hadjsaid et al. (1999) mostra, através de um exemplo simples, o efeito das fontes de GD nas correntes de falta detectadas pelos dispositivos de proteção. Nesse trabalho é sugerida uma retificação da coordenação da proteção para cada inserção de GD. Entretanto, essa metodologia só se mostra funcional para uma penetração de GD que supra até 20% da carga do sistema.

Em Popovic et al. (2005), é formulada e discutida uma metodologia para a alocação ótima de geradores distribuídos e religadores, buscando segurança e confiabilidade para a rede de distribuição. A alocação ótima de GD é determinada por uma análise de sensibilidade e equações de fluxo de potência. Essa alocação é realizada para um conjunto de condições de carga, nível de penetração e fator de potência e é formulada como um problema de otimização de restrições seguras. Os locais obtidos por essa otimização são então considerados para otimizar a confiabilidade do sistema. São utilizados algoritmos genéticos para determinação da alocação dos religadores no sistema com geração distribuída.

Pregelj, Begovic e Rohatgi (2006) determinaram posições ótimas para instalação de religadores e geradores em sistemas de distribuição com GD. Essas fontes de GD são inseridas no sistema com restrições de potência, sendo considerada a possibilidade de operação ilhada destas. Para a solução, foi utilizado um algoritmo genético personalizado.

Já Pholborisut, Saksornchai e Eua-Arporn(2011) propõe um método para quantificar o impacto da GD na proteção de sistemas de distribuição. Isso é realizado através de um Índice de Descoordenação da Proteção, um valor que representa a probabilidade de ocorrência de descoordenação no sistema. Este método considera diretamente a coordenação entre os dispositivos, quantificando o impacto negativo da GD e também determinando a máxima capacidade permitida para inserção de GD em cada local do alimentador.

Também em 2011, Tuitemwong e Premrudeepreechacharn (2011) desenvolveram um sistema dedicado para coordenação da proteção em SDEE com GD. Esse sistema utiliza uma base de conhecimento e processo de inferência para retificar os ajustes de coordenação dos dispositivos de proteção, buscando acomodar a penetração de GD. É permitido ao usuário interagir com os ajustes dos dispositivos, porém, essa liberdade provoca a necessidade de um grande número de decisões a serem tomadas pelo usuário.

Abdel-Ghanyet al. (2015) busca determinar os locais ótimos e limites permissíveis para inserção de GD em SDEE. Os critérios considerados para essa determinação são baseados na capacidade máxima de geração das fontes dispersas, melhoria do perfil de tensão, redução de perdas e nível de corrente de curto-circuito. A coordenação entre dispositivos de proteção e o nível de tensão são considerados como restrições. A restrição de coordenação envolve religador – elo fusível e religador – relé. Também são verificados os efeitos causados por modificações nos ajustes do relé de sobrecorrente na capacidade das GD. A determinação da solução é feita através da utilização de algoritmos genéticos multiobjectivo, sendo aplicado em um sistema típico de 11 kV. Segundo os autores, o método desenvolvido possibilita a integração de grandes blocos de geração distribuída e alcançar uma considerável redução de perdas, melhoria do perfil de tensão e redução das correntes de falta sem necessidade de substituição dos dispositivos de proteção já existentes.

### **1.5.3 Descoordenação religador – elo fusível em SDEE**

Um importante problema causado na proteção de sistemas de distribuição com inserção de GD é a descoordenação entre religadores e elos fusíveis. Essa descoordenação é causada pela contribuição extra provinda da GD conectada no sistema, que, cuja magnitude pode provocar a operação incorreta dos dispositivos. Para solucionar esse problema, diversos métodos tem sido propostos na literatura.

Em Brahma e Girgis (2002), religadores microprocessados foram utilizados para permitir a coordenação religador – elo fusível em sistemas de distribuição com GD. Foi considerada uma margem de coordenação entre os dispositivos, sendo necessária a flexibilidade na escolha das curvas de operação do religador. O método proposto foi testado em um sistema com até 200% de penetração de GD e foi comprovada a impossibilidade da utilização de religadores tradicionais para coordenação entre os dispositivos de proteção em sistemas com GD.

Girgis e Brahma (2001) e Brahma e Girgis (2004) discutem a coordenação elo-religador na presença de GD. Religador e elo são coordenados para uma falta em um ramal lateral sem considerar a GD. Para uma falta em um ramal lateral de um sistema com GD, a corrente sobre o elo será maior que no religador, resultando em uma perda de coordenação entre os dispositivos. Nestes dois trabalhos são propostos métodos que exigem a troca dos religadores originais por dispositivos microcontrolados, para que, durante a atuação de um religador na sua curva rápida, as fontes de GD à jusante do religador sejam desconectadas antes do primeiro religamento, buscando evitar uma reconexão de GD sem a devida sincronização. Apesar de ser este o procedimento definido pela norma IEEE 1547 (BASSO; FRIEDMAN, 2003), desconectar todas as GD do sistema toda vez que uma falta temporária ocorre reduzirá consideravelmente a confiabilidade do sistema.

Em Chaitusaney e Yokohama (2008) foi proposto um método para determinar o limiar permissível para a inserção de GD de modo a garantir a manutenção da coordenação religador – elo fusível e prevenir a deterioração da confiabilidade. Foram considerados SAIFI, SAIDI e ENS. O objetivo dos autores é maximizar a potência gerada pela GD por meio de restrições de fluxo de potência, onde a potência da subestação e da GD devem ser menores que os limites estabelecidos para cada uma, respectivamente. As restrições de proteção dizem respeito à manutenção da magnitude das correntes de falta submetidas aos dispositivos de proteção (relé, religador e elo fusível) dentro de um intervalo permissível.

Naiem (2012) apresentaram uma nova abordagem para estudar o impacto da GD na coordenação religador – elo fusível. É realizado um processo de avaliação através de uma técnica de classificação para discriminar casos onde faltas causam descoordenação ou não. Duas ações complementares são propostas: a busca por melhores locais para instalação da GD baseado no menor número de casos classificados como “coordenação mantida”. A segunda envolve a modificação das características operativas dos religadores para minimizar os casos onde há descoordenação religador – elo fusível.

Um esquema adaptativo foi desenvolvido por HUSSAIN et al. (2013) para garantir o funcionamento da filosofia *fuse saving* em sistemas de distribuição com GD. Esse método se beneficia das características temporizadas e instantâneas (funções 50 e 51) para manutenção da coordenação entre religador e elos fusíveis em SDEE com GD. Dependendo do nível de penetração de GD no SDEE, é sugerida a substituição de religadores já instalados e coordenados por religadores microprocessados com função de comunicação. Outro problema encontrado é que não há garantia de funcionamento do método proposto para diferentes níveis de penetração de GD caso a função instantânea do religador tenha uma corrente de pick-up fixa. Para solucionar isso, os autores propuseram um algoritmo para a alteração *online* da corrente de *pick-up* da função instantânea do religador em resposta à diferentes cenários de inserção de GD.

Shah e Bhalja (2014) propuseram um novo esquema de proteção adaptativo para SDEE com GD baseado no cálculo de uma razão entre a corrente do alimentador e do religador, modificando curva de operação do religador e conseqüentemente aumentando a margem de coordenação. Esse método avaliou o impacto de diferentes níveis de penetração de GD, porém, considerando apenas a manutenção das correntes de falta dentro da zona de coordenação delimitada pelas curvas de atuação dos dispositivos de proteção.

#### **1.5.4 Alocação de limitadores de corrente de falta em SDEE com GD**

Um solução proposta para redução da influência negativa das fontes de GD em SDEE é a utilização de limitadores de corrente de falta (LCF). Kim, Lim e Kim (2012) realizaram um estudo da aplicação de limitadores de corrente de falta de estado sólido (LCFES) juntamente com a análise da coordenação entre dispositivos de proteção em sistemas de distribuição de energia elétrica. Foram investigados métodos para manutenção da operação dos dispositivos de proteção, considerando a aplicação do LCFES, através das curvas tempo x corrente do dispositivo de proteção. Foram determinadas as correntes de atuação e *diais* de tempo dos relés para manutenção da coordenação entre estes no advento da instalação de LCFES. Através da análise das características tempo x corrente, uma corrente de atuação mais alta e um *dial* de tempo menor pode ser confirmada a coordenação dos dispositivos de proteção caso o LCFES seja introduzido no sistema com uma impedância fixa.

Lim et al. (2012) analisaram a coordenação de dispositivos de proteção considerando a instalação de LCFES em um sistema de distribuição com GD foi analisada. Os autores realizaram testes de curto-circuito para diversos cenários de presença de GD e aplicações de

LCFES. Os tempos de atuação de dispositivos religadores e relés de proteção foram avaliados para diferentes níveis de corrente de falta, mostrando que a aplicação de LCFES com resistência fixa em sistemas de distribuição com GD contribuí para manter os tempos de atuação dos dispositivos de proteção em valores coordenados entre si.

Guarda (2012) desenvolveu uma metodologia para manutenção do tempo de operação de relés de sobrecorrente em sistemas elétricos de potência quando da inserção de GD, através da alocação de LCFES. Nesse trabalho também foi desenvolvida uma metodologia para alocação desses limitadores em sistemas de distribuição, com o intuito de reduzir o número de elos fusíveis e religadores a serem substituídos devido a contribuição da GD para correntes de curto-circuito.

Bagriyanik, Cabal e Bagriyanik (2013) realizaram uma comparação entre os tipos de limitadores de corrente utilizados para redução dos efeitos da geração distribuída em sistemas elétricos de potência. Primeiramente, é feita uma análise da rede para determinar o tipo de limitador de corrente (Resistivo – RLCF, Indutivo – ILCF ou Complexo – CLCF) mais indicado para instalação. Então, um estudo comparativo entre estes limitadores foi realizado para investigar o efeito da dimensão e tipo de LCF na amplitude e fase das correntes de falta contribuídas pela GD e pela rede. Para ilustrar o impacto do LCF na restauração da coordenação entre relés, um algoritmo de otimização é usado para determinar a dimensão mínima do LCF e o consequente impacto da impedância do LCF no intervalo de coordenação entre a proteção primária e de retaguarda.

Mahmoudian, Niasati e Khanesar (2017) desenvolveram uma metodologia para determinação do número e local de instalação ótimos para LCF, com o intuito de garantir um aumento da confiabilidade do fornecimento de energia elétrica. Os autores utilizaram algoritmos de otimização de Pareto para determinar as melhores soluções para todos os objetivos simultaneamente. Os resultados dos diferentes algoritmos de otimização considerados foram semelhantes, porém, os LCF apresentaram uma impedância muito alta comparada com as impedâncias de LCF comerciais.

### **1.5.5 Considerações acerca do estado-da-arte**

É possível notar que a acomodação de fontes de GD em SDEE é um assunto importante para um futuro onde as redes inteligentes serão realidade. Se a alocação dos dispositivos de proteção não for realizada juntamente com a alocação das fontes de GD na etapa de projeto, as

alterações causadas por estas nos sistemas de proteção provocam a necessidade de intervenções posteriores. Os trabalhos desenvolvidos que buscaram soluções para reduzir o impacto da GD nos SDEE são focados principalmente na descoordenação religador – elo fusível. Ao abordar esse tema, as soluções apresentadas buscam somente alterações no sistema de proteção para garantir que a corrente de falta, composta pelas contribuições da subestação e da GD, respectivamente, esteja dentro da zona de coordenação determinada por esses dispositivos. Porém, esses trabalhos não consideram a possibilidade de contribuição da GD para uma falta durante a operação rápida do religador, sendo desconsiderado o sentido da corrente de falta e a seletividade entre elos fusíveis.

## 1.6 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

Como contribuições da tese, é possível citar:

- Desenvolvimento de uma metodologia que possibilita o estudo completo do sistema de proteção, incluindo alocação, dimensionamento e coordenação dos dispositivos de proteção;
- Utilização de regras heurísticas para alocação de elos fusíveis em SDEE, simplificando o processo de alocação desses dispositivos;
- Desenvolvimento de um método multiobjetivo para alocação de limitadores de corrente de falta e alteração da operação de religadores, de modo a solucionar problemas de descoordenação religador – elo fusível em SDEE com GD diretamente acoplada, levando em consideração aspectos de coordenação e seletividade que não são considerados por autores na literatura. A inexistência de trabalhos considerando esses critérios levou à necessidade de realização de uma busca exaustiva com o intuito de validar o método desenvolvido.

## 1.7 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma:

No capítulo 2 é apresentada a metodologia híbrida para alocação de dispositivos de proteção em sistemas de distribuição de energia elétrica, bem como o método para

## *Capítulo 1 – Introdução*

---

dimensionamento e coordenação destes. Também é apresentado o algoritmo de enxame de partículas, método de otimização utilizado para encontrar a solução do problema de alocação;

No capítulo 3 é apresentado o método desenvolvido para reduzir a influência das fontes de geração distribuída nos sistemas de distribuição de energia elétrica, através da alocação de limitadores de corrente de falta;

Os resultados obtidos na aplicação das metodologias são apresentados no capítulo 4, onde é mostrada tanto a alocação dos dispositivos de proteção quanto os coordenogramas referentes a cada sistema teste quando da consideração de diversas combinações de fontes de geração distribuída e limitadores de corrente de falta;

O Capítulo 5 conta com a discussão sobre o desenvolvimento do trabalho e as conclusões obtidas ao final deste, bem como sugestões para trabalhos futuros;

## **2 METODOLOGIA HÍBRIDA PARA ALOCAÇÃO DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO**

### **2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS**

Neste capítulo é apresentada a metodologia híbrida para a alocação de dispositivos de proteção em sistemas de distribuição de energia elétrica. Primeiramente, a alocação de elos fusíveis é realizada de forma heurística, utilizando critérios disponíveis em normas desenvolvidas por empresas de energia elétrica. Posteriormente, é utilizada a metaheurística Enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization* – PSO) para determinação da alocação de religadores.

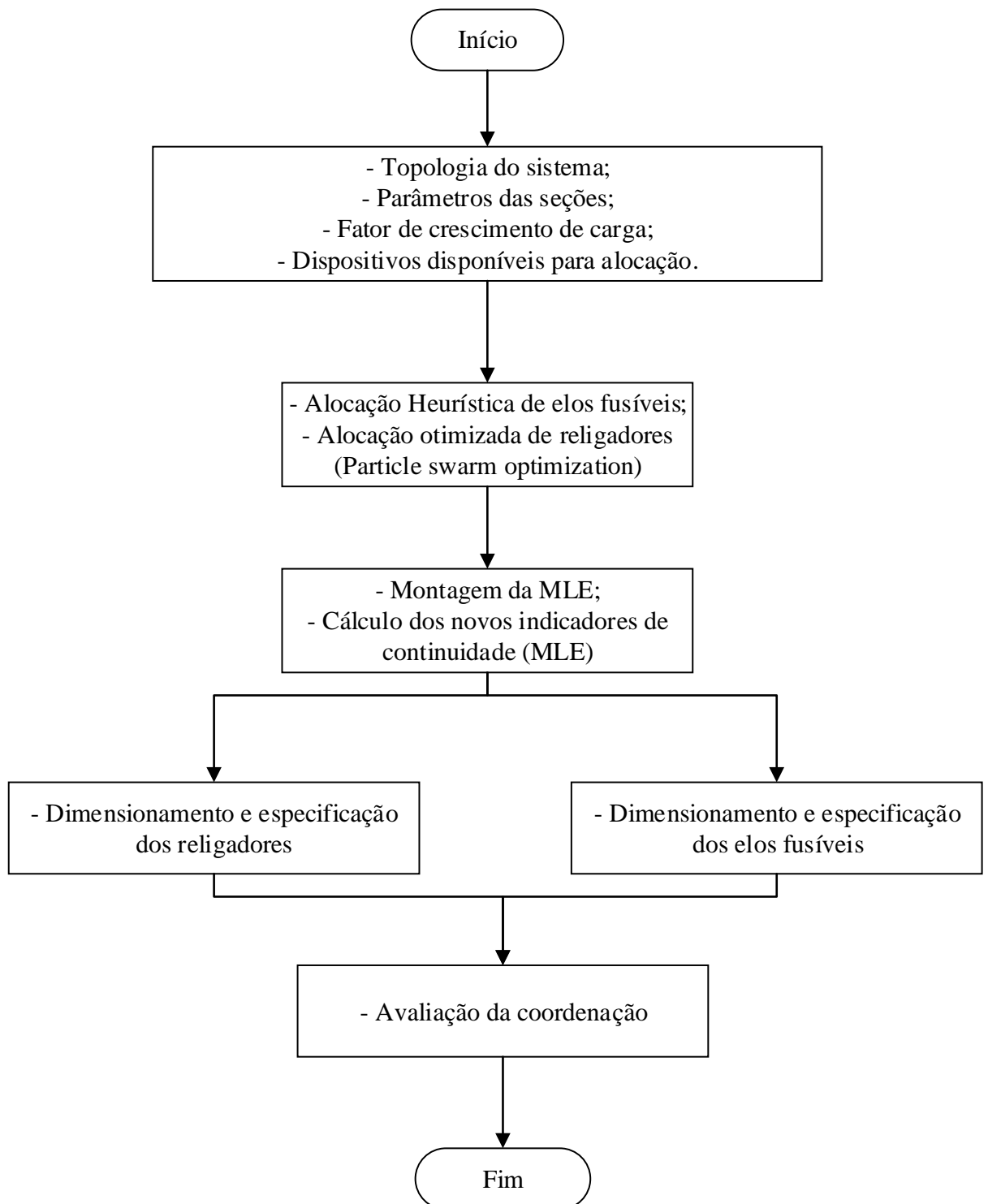
### **2.2 VISÃO GERAL**

A Figura 2.1 mostra o fluxograma do método proposto. Primeiramente, os dados de entrada são informados ao algoritmo, e o levantamento da configuração do sistema é realizada com o intuito de facilitar o acesso aos dados referentes às seções de interesse. No final da primeira etapa, um esquema de proteção coordenado é obtido, com todos os dispositivos de proteção alocados e dimensionados de acordo com Gönen (2008).

Os dados de entrada são obtidos analisando a topologia do sistema de distribuição considerado. Esta será representada como um grafo não-orientado, onde cada nó representa um ponto de interesse, e as arestas correspondem às seções do sistema de distribuição. Cada seção interligando dois nós do sistema possui uma série de parâmetros associada, bem como as taxas de faltas de cada seção. O fator de crescimento de carga representa uma previsão de expansão na demanda de energia elétrica em relação à um horizonte de estudo em anos. A quantidade de dispositivos de proteção disponíveis para alocação são determinados pelo operador e esse número é utilizado como restrição.



Figura 2.1 – Fluxograma do método de alocação dos dispositivos de proteção



### 2.3 DADOS DE ENTRADA

A representação do sistema de distribuição é realizado através da teoria de grafos, onde cada ponto de interesse caracteriza um vértice, ou nó, e a conexão entre dois nós representa uma aresta. Uma aresta conectando dois nós representa uma seção do sistema de distribuição. As Figuras 2.2 e 2.3 mostram um sistema de distribuição genérico e sua respectiva representação como um grafo.

Na Figura 2.3, os índices  $\{S1, S2, S3, \dots, Sn\}$  representam as seções do sistema. Essas seções são reunidas na matriz chamada *Topologia*, que permite o rápido acesso do algoritmo às seções e seus respectivos nós inicial e nó terminal. A Matriz *Topologia* é mostrada na Tabela 2.1.

Figura 2.2 – Sistema de distribuição genérico

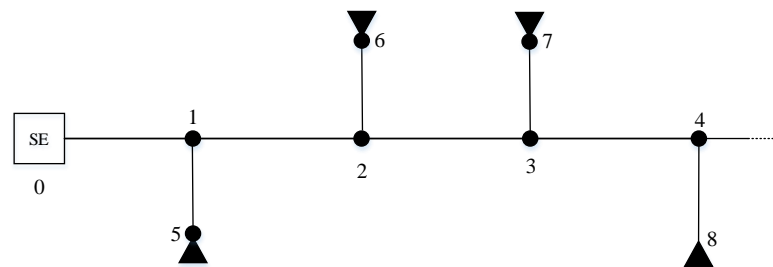
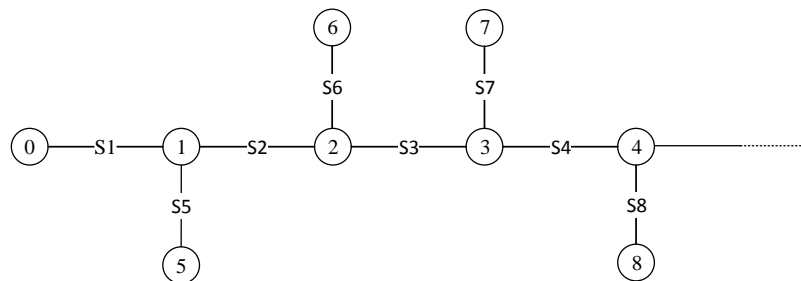


Figura 2.3 – Grafo representativo do sistema de distribuição genérico



Essa matriz é composta por  $n_s$  seções, onde  $n_i$  representa o nó inicial da seção e  $n_f$  o nó final. Com as seções componentes do sistema de distribuição determinadas, cada uma apresenta diversos parâmetros associados, tais como comprimento, taxas de falha, correntes de curto-

*Capítulo 2 – Metodologia Híbrida para Alocação de Dispositivos de Proteção*

circuito, tempos de restabelecimento, entre outros. Esses parâmetros são reunidos em uma matriz de parâmetros, Tabela 2.2, que servirá como banco de dados para facilitar o acesso do algoritmo à esses parâmetros.

Tabela 2.1 – Matriz *Topologia*

Seção	S1	S2	S3	S4	S5	...	$n_s$
Nó inicial	0	1	2	3	1	...	$n_i$
Nó Final	1	2	3	4	5	...	$n_f$

Tabela 2.2 – Matriz de parâmetros

Seções	1	2	3	4	...	$n_s$
Comprimento	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$	...	$l_n$
Taxa de falha	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	...	$\lambda_n$
Carga	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	...	$S_n$
Nº Consumidores	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	...	$C_n$
Tempo deslocamento	$t_{desl-1}$	$t_{desl-2}$	$t_{desl-3}$	$t_{desl-4}$	...	$t_{desl-n}$
Tempo de Restabelecimento	$TR_1$	$TR_2$	$TR_3$	$TR_4$	...	$TR_n$
Corrente de carga	$I_{c-1}$	$I_{c-2}$	$I_{c-3}$	$I_{c-4}$	...	$I_{c-n}$
Curto-circuito mínimo	$I_{cc_{min-1}}$	$I_{cc_{min-2}}$	$I_{cc_{min-3}}$	$I_{cc_{min-4}}$	...	$I_{cc_{min-n}}$
Curto-circuito máximo	$I_{cc_{max-1}}$	$I_{cc_{max-2}}$	$I_{cc_{max-3}}$	$I_{cc_{max-4}}$	...	$I_{cc_{max-n}}$

Em que:

$l$  : Comprimento (km);

$\lambda$  : Taxa de falha (falhas/km.ano);

$S$  : Carga (kVA);

$C$  : N° de Consumidores;

$t_{desl}$  : Tempo de deslocamento das equipes de manutenção;

$I_c$  : Corrente de carga;

$I_{cc_{min}}$  : Corrente de curto-circuito mínima no final da seção;

$I_{cc_{max}}$  : Corrente de curto-circuito máxima na seção;

Com a topologia do sistema de distribuição definida, são definidos três tipos de conjuntos de seções componentes desse alimentador. Essa classificação visa reduzir o espaço de busca na alocação dos dispositivos. As definições dos conjuntos de seções são:

- **Troncal ou alimentador primário:** É o trecho principal do alimentador, geralmente composto por condutores de maior bitola;
- **Subtroncais:** Derivações da troncal, que alimentam cargas em tensão primária de distribuição e também ramais;
- **Ramais:** São trechos do sistema de distribuição que alimentam diretamente os transformadores de distribuição.

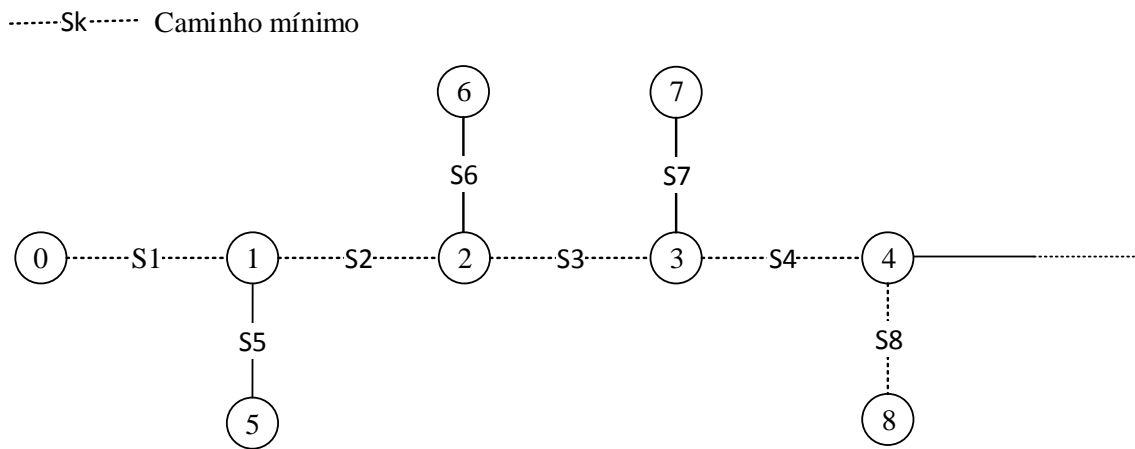
Esses conjuntos são definidos com o intuito de reduzir o espaço de busca na alocação de elos fusíveis, já que estes não podem ser alocados nos alimentadores primários. Para o sistema genérico da Figura 2.3, o conjunto Troncal será:

$$T = \{S1, S2, S3, S4, \dots, Sn\} \quad (2.1)$$

Onde  $n$  representa o número de seções da troncal.

Os caminhos mínimos relacionado a cada ponto de carga de um sistema de distribuição é o conjunto de seções à montante que conectam o nó de carga considerado ao nó inicial da subestação. Na Figura 2.4 é mostrado o caminho mínimo relativo ao ponto de carga 8. Esses caminhos facilitam a obtenção dos dispositivos à serem coordenados pelo método proposto. O algoritmo para rastreamento dos caminhos mínimos é o Algoritmo de Dijkstra, disponível no Matlab®.

Figura 2.4 – Caminho mínimo em um sistema de distribuição



Nesse caminho mínimo, o conjunto de seções será:

$$C_8 = \{S8, S4, S3, S2, S1\} \quad (2.2)$$

A determinação dos alimentadores secundários é realizada através da subtração entre o caminho mínimo e a troncal, ou seja:

$$Subtroncal = \{Troncal\} \cap \{Cam.Mínimo\} \quad (2.3)$$

Os caminhos mínimos são importantes para a determinação de uma matriz chamada *Dispositivos*, onde serão armazenadas as seções com instalação de dispositivos de proteção para posterior análise de coordenação.

Essa matriz, mostrada na Tabela 2.3, tem suas células preenchidas de acordo com a alocação de elos fusíveis, religadores e conjunto relé/disjuntor.

Tabela 2.3 – Matriz *Dispositivos*

		Seções															...	$ns$
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
Caminhos mínimos	1																...	$Ds_1$
	2															$Ds_2$		
	3															$Ds_3$		
	...	...																...
	$nc$																	$Ds_n$

Onde:

$nc$ : Número de caminhos mínimos do sistema de distribuição;

$ns$ : Número de seções do alimentador;

$Ds_1$ : Dispositivo de proteção instalado na seção do caminho mínimo 1;

$Ds_2$ : Dispositivo de proteção instalado na seção do caminho mínimo 2;

$Ds_3$ : Dispositivo de proteção instalado na seção do caminho mínimo 3;

$Ds_n$ : Dispositivo de proteção instalado na seção do caminho mínimo  $n$ .

Essa matriz será preenchida de acordo com o tipo de dispositivo de proteção instalado na mesma:

- Caso o valor seja 0 (zero): Não haverá dispositivo de proteção instalado na seção;
- Caso o valor seja 1: Haverá um elo fusível instalado na seção;
- Caso o valor seja 2: Haverá um religador instalado na seção;
- Caso o valor seja 3: Haverá um conjunto relé/disjuntor instalado na seção;

## 2.4 ALOCAÇÃO HEURÍSTICA DE ELOS FUSÍVEIS

As alocação heurística de elos fusíveis consiste na utilização de regras predefinidas utilizadas por empresas de energia que têm o intuito de definir diretamente os pontos onde é obrigatória a instalação desses dispositivos. Essas regras foram elaboradas considerando particularidades operacionais e características dos alimentadores. Portanto, as situações que requerem a instalação de elos fusíveis são (ELETROBRAS, 1982) (CPFL, 2016):

- Início de alimentadores com menos de 150 m: Esse critério busca determinar a alocação de elos fusíveis em alimentadores ou ramais curtos, onde a instalação de religadores não seria economicamente viável;
- Seções longas, maiores que 300 metros, protegidas por religador: Em seções longas que são protegidas por religadores, as derivações e transformadores de distribuições devem ser protegidos por elos fusíveis;
- Entradas primárias de energia que demandam acima de 140 A: Obrigatoriamente, as entradas de consumidores com mais de 140 A devem ser protegidas por elos fusíveis;
- Transformadores de distribuição: Todo transformadores de distribuição deve ser protegido por elos fusíveis;
- Bancos de capacitores: Bancos de capacitores devem ser protegidos por elos fusíveis.

## 2.5 ALGORITMO DE ENXAME DE PARTÍCULAS (*PARTICLE SWARM OPTIMIZATION*) E ALOCAÇÃO DE DISPOSITIVOS DE RELIGADORES

Para determinar a alocação dos religadores, foi utilizada a metaheurística *Particle Swarm Optimization* ou algoritmo de enxame de partículas, devido à sua velocidade de execução e facilidade de implementação, sendo que os parâmetros dessa metaheurística podem ser ajustados facilmente (PEREZ e BEHDINAN, 2007). Este é um método de busca estocástico inspirado pelo movimento coordenado de grupos de animais. A mudança na direção e velocidade de cada partícula individual resulta do efeito de influências cognitivas, sociais e

estocásticas. O objetivo comum de todas as partículas é encontrar o local mais favorável dentro de um espaço de busca. PSO pode ser utilizado para resolver problemas da forma:

$$\min : f(x) \quad (2.4)$$

s.a:

$$A.x \leq b \quad (2.5)$$

$$A_{eq}.x = b_{eq} \quad (2.6)$$

$$c(x) \leq 0 \quad (2.7)$$

$$c_{eq}(x) = 0 \quad (2.8)$$

$$lb \leq x \leq ub \quad (2.9)$$

Onde:

$x, b, b_{eq}, lb$  e  $ub$  são vetores, e  $lb$  representa o limite inferior e  $ub$  o limite superior.

$A$  e  $A_{eq}$  são matrizes. As funções  $f(x)$ ,  $c(x)$  e  $c_{eq}(x)$  podem ser funções não lineares. A função de aptidão  $f(x)$  quantifica o desempenho de  $x$ .

Para realizar a atualização da velocidade e posição das partículas, são utilizadas as equações (2.10) e (2.11), respectivamente.

$$v_i^{k+1} = \phi^k v_i^k + \alpha_1[\gamma_{1,i}(P_i - x_i^k)] + \alpha_2[\gamma_{2,i}(G - x_i^k)] \quad (2.10)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (2.11)$$

Nessa formulação, tem-se que:

$x_i^k$  e  $v_i^k$ : Vetores que representam a posição e velocidade atuais da partícula  $i$ , na  $k$ -ésima geração.

$P_i$ : Vetores com a melhor posição pessoal de cada indivíduo;

$G$ : Vetores com a melhor posição global observada entre todas as partículas do enxame, até a geração atual;

$\gamma_{1,i}$  e  $\gamma_{2,i}$ : São valores uniformemente distribuídos no intervalo  $[0,1]$ ;

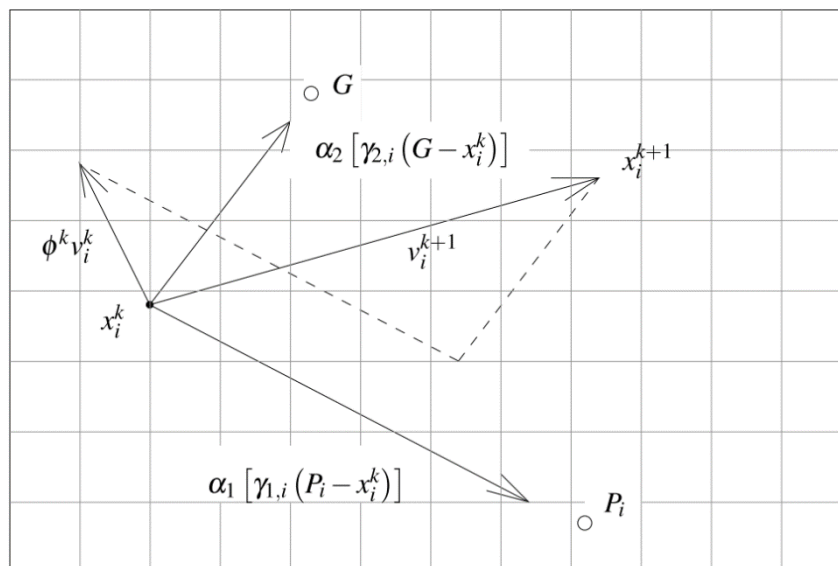
$\alpha_1$  e  $\alpha_2$ : São constantes de aceleração;



$\phi^k$  : Função de inércia com o intuito de proporcionar momentum às partículas.

A representação gráfica do PSO é mostrada na Figura 2.5, em um espaço de busca bidimensional. A nova velocidade,  $v_i^{k+1}$ , é a soma do momento que tende a manter a partícula no seu curso atual. Esta é atraída no sentido do seu ótimo pessoal  $P$  e finalmente, há a atração de todo o enxame na direção do ótimo global  $G$ . A nova posição,  $x_i^{k+1}$  é o somatório da posição atual  $x_i^k$  e a velocidade  $v_i^{k+1}$ .

Figura 2.5 – Representação gráfica do *PSO*



As condições necessárias para a estabilidade do enxame foi derivada de Perez e Behdinan (2007), e são mostradas em (2.12) e (2.13).

$$\alpha_1 + \alpha_2 < 4 \quad (2.12)$$

$$\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} - 1 < \phi < 1 \quad (2.13)$$

Para lidar com as restrições impostas, foi considerado um método de penalização. Este penaliza partículas que violem restrições atribuindo um alto valor de função objetivo para as mesmas. Esse valor deverá ser maior que o maior valor possível no espaço de busca

considerado. Como consequência, as partículas se encontram livres para mover-se através das restrições, porém, serão atraídas para a região factível do espaço de busca.

## 2.6 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

No problema considerado, cada partícula será representada por um vetor onde cada bit representa a instalação ou não do religador. No problema considerado, o preenchimento de um bit da partícula com 0 indica que não há instalação de um religador na seção, e 1 indica a instalação. O número de bits a compor as partículas é dependente do número de seções do alimentador, ou seja, para um alimentador composto por  $ns$  seções, cada partícula será representada por um vetor  $1 \times ns$ , como mostra a Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Representação das partículas em um enxame

		Seções					
		1	2	3	4	...	$ns$
Partículas	$p_1$						
	$p_2$						
	$p_3$						
	$p_4$						
	...						
	$p_n$						

A função objetivo envolve a minimização do indicador DEC, FEC e também do indicador  $MAIFI_E$ , que compreende as interrupções temporárias, ou seja:

$$\min FO = w_{DEC} \cdot \frac{DEC}{DEC_e} + w_{FEC} \cdot \frac{FEC}{FEC_e} + w_{MAIFI} \cdot \frac{MAIFI_E}{MAIFI_{E_e}} + Pen \quad (2.14)$$

Onde:

$w_{DEC}$  : Peso relativo ao indicador DEC;

$DEC$  : Valor calculado do indicador DEC;

$DEC_e$  : Valor esperado do indicador DEC;

$w_{FEC}$  : Peso relativo ao indicador FEC;

$FEC$  : Valor calculado do indicador FEC;

$FEC_e$  : Valor esperado do indicador FEC;

$w_{MAIFI_e}$  : Peso relativo ao indicador  $MAIFI_E$ ;

$MAIFI_E$  : Valor calculado do indicador  $MAIFI_E$ ;

$MAIFI_{E_e}$  : Valor esperado do indicador  $MAIFI_E$ ;

$Pen$  : Penalização.

Os pesos da função objetivo são ajustados de acordo com a prioridade de cada indicador para determinada situação.

Os indicadores de continuidade DEC e FEC são calculados através da matriz lógico-estrutural (POPOV et al., 2004). O indicador  $MAIFI_E$  é calculado de acordo com a Equação (2.15).

$$MAIFI_E = \frac{E_{int} \times N_i}{N_T} \quad (2.15)$$

Onde:

$E_{int}$  : Número de eventos de interrupção do dispositivo de proteção no período de tempo considerado;

$N_i$  : Número de consumidores atingidos por interrupções momentâneas, no período de tempo considerado;

$N_T$  : Número total de consumidores supridos na área de interesse.

### **2.6.1 Restrições do problema**

As restrições do problema de alocação de dispositivos de proteção buscam englobar características técnicas e econômicas. Essas restrições envolvem a obrigatoriedade de instalação de dispositivos em seções predeterminadas, o número máximo de dispositivos disponíveis para instalação, a consideração de cargas importantes e em alimentadores ou ramais

com alta taxa de falhas temporárias, bem como a proibição da alocação de religadores a jusante de elos fusíveis.

#### 2.6.1.1 Restrição 1: Conjunto de posições candidatas à instalação do religador

Essa restrição busca adequar o problema às regras heurísticas estabelecidas nas normas das concessionárias de energia para a alocação de dispositivos de proteção. Ou seja, cada indivíduo do enxame terá uma representação binária  $1 \times nr$ , onde  $nr$  corresponde ao número de seções candidatas à instalação do religador. Essa restrição também elimina a necessidade de uma restrição para seções de instalação proibida de religadores, uma vez que o dispositivo poderá ser alocado apenas em seções contidas no conjunto  $R$ .

$$R \in \{r_1, r_2, r_3, \dots, r_n\} \quad (2.16)$$

#### 2.6.1.2 Restrição 2: Número máximo de dispositivos a serem alocados

Esta restrição busca adequar economicamente o problema, permitindo ao operador determinar o número de religadores à serem alocados, podendo este ser o número de dispositivos disponíveis para alocação. Ou seja:

$$0 \leq n_{rel} \leq n_{max\_rel} \quad (2.17)$$

Em que:

$n_{rel}$  : é o número de religadores a serem alocados no sistema;

$n_{max\_rel}$  : é o número máximo de religadores disponíveis.

#### 2.6.1.3 Restrição 3: Seções com alocação obrigatória de religadores

Outra restrição que busca alcançar a solução que satisfaça as regras heurísticas determinadas pelas concessionárias. Esta restrição estabelece seções onde a instalação de religadores é obrigatória. Esta posição,  $r_{pos\_i}$ , deve estar presente no conjunto  $R$ , que representa

as seções candidatas à instalação do religador. Ou seja, para todo alimentador, deve-se satisfazer:

$$r_{pos\_i} = \{r_{pos\_i} \in R \mid x_i = 1\} \quad (2.18)$$

Considerando a seção  $i$ , definida como seção com instalação obrigatória de religador, o valor correspondente à essa seção em todo enxame considerado deve ser 1.

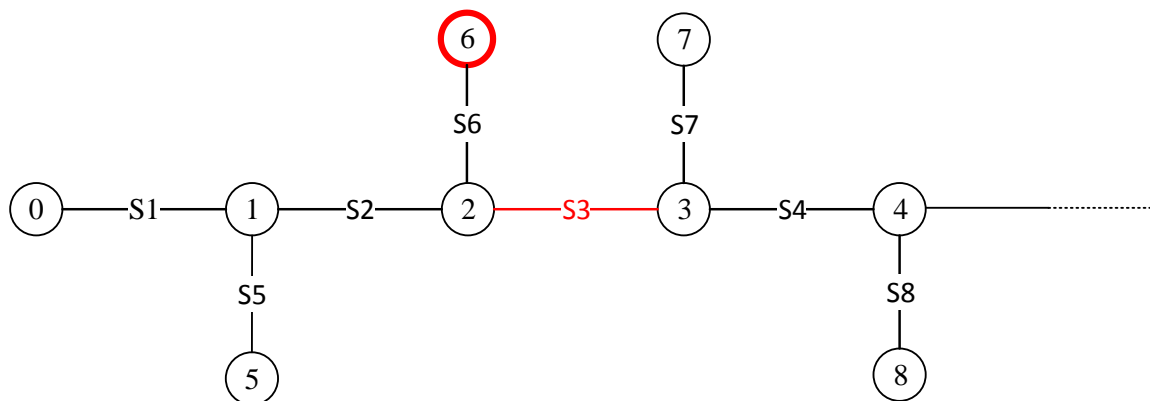
As regras para definição das seções com instalação obrigatória de religadores são definidas preliminarmente pelo operador, sendo estas:

Caso um ponto de carga seja escolhido como carga importante, deverá contar com a instalação de um religador na seção à jusante da ramificação da troncal que alimenta a carga considerada, como mostrado na Figura 2.6.

Nesse caso, considerando o ponto de carga 6 como sendo carga importante, obrigatoriamente a seção S3 deverá contar com a instalação de um religador, evitando assim que faltas à jusante deste ramificação afetem o ponto 6.

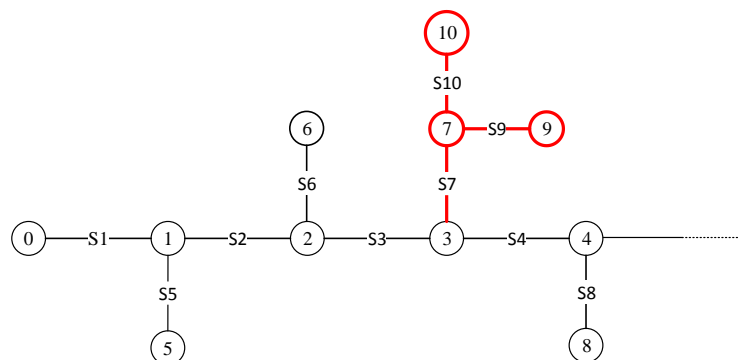
Caso o alimentador secundário composto pelas seções {S7, S9, S10} apresentar uma taxa de falta temporária superior à um limite escolhido preliminarmente, a seção S7 deverá, obrigatoriamente, receber a instalação de um religador.

Figura 2.6 – Alocação obrigatória de religador considerando cargas importantes



Também deve apresentar alocação obrigatória de religador o início de subtroncais ou ramais que apresentem uma alta taxa de faltas temporárias, como mostra a Figura 2.7.

Figura 2.7 – Alocação obrigatória de religadores considerando a taxa de falha temporária de alimentadores secundários e ramais



#### 2.6.1.4 Restrição 4: Alocação de elos fusíveis à montante de religadores

Caso um indivíduo do enxame apresente uma configuração onde um elo fusível está presente no conjunto de seções à montante do religador, esta solução é penalizada e deixa de ser uma das soluções candidatas à ótima. Essa restrição é necessária pois a alocação de fusíveis no lado da fonte é uma prática não comum (ELETROBRAS. 1982) (CPFL, 2016), visto que para uma falta transitória, o elo fusível poderá atuar antes da operação rápida do religador, eliminando a vantagem de utilização do mesmo.

#### 2.6.1.5 Restrição 5: Número máximo de religadores em série;

Devido à dificuldade de coordenação, o número máximo de religadores em série é limitada em no máximo 3.

### 2.6.2 Dimensionamento e coordenação dos dispositivos de proteção

Após ter sido determinada a alocação dos dispositivos, a matriz *Dispositivos* é utilizada como referência para estudos de dimensionamento e coordenação entre os dispositivos de proteção. Duas matrizes são espelhadas na matriz *Dispositivos* para armazenar os valores das

correntes de atuação de fase e neutro dos dispositivos instalados que são calculadas pelo algoritmo: matriz *Dimensionamento\_Fase* e matriz *Dimensionamento\_Neutro*. Ambas matrizes possuem as mesmas características da matriz *Dispositivos*, sendo composta, em suas linhas, pelos caminhos mínimos relativos aos pontos de carga e as colunas pelas seções do sistema de distribuição.

### 2.6.2.1 Dimensionamento de elos fusíveis

O dimensionamento de elos fusíveis é realizado da forma tradicional. De acordo com (ELETROBRÁS, 1982) (GÖNEN, 2008), o dimensionamento de elos fusíveis depende de um fator de crescimento de carga, corrente nominal do trecho, fator de sobrecarga e da corrente de curto-circuito fase-terra mínima no final do trecho protegido pelo elo (2.19) (2.20).

$$FC \cdot I_{c \arg a_{\max}} < Inom_{elo} \quad (2.18)$$

$$Inom_{elo} \leq \frac{I_{ccFT \min}}{4} \quad (2.19)$$

Onde:

$I_{c \arg a_{\max}}$ : é a corrente máxima de carga que circulará através do elo fusível, medida no ponto de instalação do mesmo;

$Inom_{elo}$ : é a corrente nominal do elo fusível;

$I_{ccFT \min}$ : Corrente de curto-circuito fase-terra mínima no final do trecho protegido;

$FC$ : é o fator de crescimento de carga em um horizonte de estudo, dado por:

$$FC = \left(1 + \frac{x\%}{100}\right)^a \quad (2.21)$$

Onde:

$x\%$ : Fator percentual de crescimento de carga anual

$a$ : Número de anos considerado como horizonte de estudo.

## 2.6.2.2 Dimensionamento de religadores

Para determinação do ajuste do pick-up de fase do religador, deve ser considerado que a corrente mínima de disparo de fase seja menor que a corrente de falta bifásica dentro da zona de proteção do dispositivo, sempre buscando incluir a possibilidade de expansão do sistema e manobras. O pick-up de fase também deve ser maior ou igual à máxima corrente de carga (considerando manobras usuais no ponto de instalação do religador), multiplicada por um fator de crescimento de carga, como mostrado em (2.22).

$$FC \cdot I_{carga\_max} \leq I_{pickup\_fase} \leq \frac{I_{2f}}{FS} \quad (2.22)$$

Em que:

$FC$  : Fator de crescimento de carga;

$I_{carga\_max}$  : Corrente de carga máxima;

$I_{pickup\_fase}$  : Corrente de *pick-up* de fase do religador

$I_{2f}$  : Corrente de curto-circuito bifásico na zona de proteção do religador;

$FS$  : Fator de segurança (1,5 a 2).

Já para o ajuste do disparo de neutro, a corrente mínima deve ser menor que a corrente de falta monofásica-terra mínima dentro da zona de proteção do dispositivo. Também deve ser maior que a máxima corrente de desequilíbrio admitida pela concessionária, como mostra (2.23).

$$I_{deseq} \leq I_{pickup\_neutro} \leq \frac{I_{cc-ft\ min}}{FS} \quad (2.23)$$

Onde:

$I_{deseq}$  : Corrente de desbalanço máxima entre fases admitida;

$I_{pickup\_neutro}$  : Corrente de atuação da proteção de neutro;

$I_{cc-ft\ min}$  : Corrente mínima de curto-circuito fase-terra no final do trecho protegido;



## 2.6.2.2 Dimensionamento do conjunto relé/disjuntor

Na metodologia desenvolvida é considerado que a subestação contará com um conjunto disjuntor/relé para proteção do sistema. Esse relé é equipado com elementos temporizados e instantâneos de atuação, bem como transformadores de corrente (TC). Os relés considerados nesse trabalho são do tipo IEC. Para o dimensionamento dos transformadores de correntes são considerados dois critérios:

- Critério da corrente de carga máxima:

- Considerando um fator de sobrecarga:

$$I_{carga-max} = FS \cdot I_{carga} \quad (2.24)$$

- Considerando o valor do curto-circuito máximo:

$$I_{p-nom} = \frac{I_{cc-max}}{FS} \quad (2.25)$$

A determinação do ajuste do pick-up de fase do relé de sobrecorrente será então realizado através de (2.26), de acordo com ELETROBRÁS (1982) e GÖNEN (2008).

$$\frac{I_{carga-max} \cdot FC}{RTC} \leq I_{pickup-51F} \leq \frac{I_{cc_{2f}}}{RTC \cdot FI \cdot FS} \quad (2.26)$$

Em que:

$FC$  : Fator de crescimento de carga;

$I_{carga-max}$  : Corrente de carga máxima no alimentador;

$RTC$  : Relação de transformação de corrente;

$FS$  : Fator de sobrecorrente;

$FI$  : Fator de início da curva do relé;

$I_{pickup-51F}$  : Valor da corrente de atuação de fase do relé de sobrecorrente;

$I_{cc_{2f}}$  : Corrente de curto-circuito bifásico no final da zona de proteção do relé;

Capítulo 2 – Metodologia Híbrida para Alocação de Dispositivos de Proteção

Já o ajuste do pick-up de neutro do relé de sobrecorrente deve considerar o desbalanceamento entre fases admitido pelo sistema e ser sensível à faltas monofásicas no trecho onde o relé é proteção de retaguarda, dado por :

$$k.I_{desb} < I_{pickup\_51N} < I_{cc_{1\phi-g\ min}} \quad (2.27)$$

Em que:

$k$  : Fator de sobrecorrente preestabelecido;

$I_{desb}$  : Corrente de desbalanço máximo entre fases admitido;

$I_{pickup\_51N}$  : Corrente de atuação da unidade de neutro;

$I_{cc_{1\phi-g\ min}}$  : Corrente de curto-circuito mínima no trecho onde o relé é proteção de retaguarda.

### 2.6.2.3 Coordenação entre os dispositivos de proteção

O estudo de coordenação é realizado através das matrizes *Dimensionamento\_Fase* para as definições das operações de fase dos dispositivos, e *Dimensionamento\_Neutro* para as operações de neutro. Essas matrizes são mostradas nas Tabelas 2.5 e 2.6.

Tabela 2.5 – Matriz *Dimensionamento\_Fase*

		Seções										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	...	$ns$
Caminhos mínimos	1	$k_f$	0	0	0	$F_f$	0	0	0	0	...	$DS_1$
	2	$k_f$	0	0	$R_f$	0	0	$F_f$	0	$F_f$		$DS_2$
	3	$k_f$	0	0	$R_f$	0	0	0	0	0		$DS_3$
	...	...										
	$n$	$k_{fn}$	0	0	$R_{fn}$	0	$F_f$	0	0	$F_f$	$DS_n$	

Tabela 2.6: Matriz *Dimensionamento\_Neutro*

		Seções										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	...	$ns$
Caminhos mínimos	1	$k_n$	0	0	0	0	0	0	0	0		$DS_1$
	2	$k_n$	0	0	$R_n$	0	0	0	0	0	...	$DS_2$
	3	$k_n$	0	0	$R_n$	0	0	0	0	0		$DS_3$
	...	...										
	$n$	$k_n$	0	0	$R_n$	0	0	0	0	0		$DS_n$

Onde:

$k_f$ : Dimensionamento de fase do relé de sobrecorrente;

$R_f$ : Dimensionamento de fase do religador;

$F_f$ : Dimensionamento do elo fusível;

$k_n$ : Dimensionamento de neutro do relé de sobrecorrente;

$R_n$ : Dimensionamento de neutro do religador;

A determinação das curvas tempo x corrente é realizada através do aproximação polinomial, considerando a obtenção de pontos de cada curva e o polinômio referente à estas. Isso é imprescindível devido à necessidade da determinação de interseção entre curvas de elos fusíveis e religadores, bem como as diferenças de tempo entre curvas de dispositivos.

O método utilizado para modelar as curvas dos dispositivos de proteção é baseado na aproximação matemática definida a partir de pontos levantados nas curvas tempo x corrente de cada dispositivo. O modelo adotado será o método da regressão polinomial, aplicado através da função *polyfit* presente no MATLAB®. O grau do polinômio a qual será aproximada a curva deverá ser ajustada pelo operador (BRAVO e ALBUQUERQUE, 2015). O polinômio será aproximado por (2.28).

$$p(x) = c_1x^n + c_2x^{n-1} + \dots + c_nx + c_{n+1} \quad (2.28)$$

Como resultado de (2.26) será obtido um vetor  $p$  com comprimento  $n+1$  contendo os coeficientes  $c_n$ , em ordem decrescente de potências  $x^n$ . Adequando-se (2.28) às grandezas envolvidas nas curvas tempo x corrente das curvas dos dispositivos, tem-se (2.29).

$$t(i) = c_1i^n + c_2i^{n-1} + \dots + c_ni + c_{n+1} \quad (2.29)$$

Onde:

$c_n$  : Coeficientes do polinômio;

$t$  : Tempo de operação do dispositivo;

$i$ : Corrente à qual está sujeita o dispositivo.

As simulações foram realizadas através de testes de aproximação e foi verificado que polinômios de graus 5 e 6 se adequam à precisão necessária para determinação das diferenças de tempo de operação e interseção entre curvas dos dispositivos.

A determinação das zonas de proteção dos dispositivos devem ser determinadas a fim de obter corretamente as correntes que devem ser consideradas para o dimensionamento e a coordenação entre os dispositivos. Nos elos fusíveis, essas zonas de proteção compreendem todas as seções localizadas à jusante do mesmo. Em religadores, a zona de proteção é determinada considerando a corrente de atuação da unidade de terra e das correntes de curto-circuito monofásicas mínimas a jusante de cada dispositivo instalado (FERREIRA, 2009). Esta zona de proteção compreende todas as seções a jusante do mesmo e seu limite é determinado pela presença de outro religador a jusante do considerado. Os conjuntos de seções a jusante serão então:

$$SJ_n = \{SJ_1, SJ_2, SJ_3, \dots, SJ_s\} \quad (2.30)$$

Em que:

$SJ_n$  : Conjunto de seções a jusante do dispositivo  $n$ ;

s: Número de seções a jusante do dispositivo  $n$ .

Ou seja, para cada dispositivo  $n$  haverá um conjunto de seções  $SJ_s$  que compreendem todas as seções localizadas após a instalação do dispositivo.

### 2.6.2.3.1 Seletividade entre elos fusíveis

Para que haja seletividade entre elos fusíveis, é necessário que o dispositivo protetor elimine a falta, seja esta temporária ou permanente, antes que o dispositivo protegido, evitando assim desconexão de um trecho maior do alimentador ou ramal. Dois métodos são considerados para determinar a região de seletividade entre elos fusíveis. No primeiro, a seletividade entre o elo fusível e o protetor é considerada satisfatória quando o tempo máximo de interrupção do elo fusível protetor for no máximo 75% do tempo mínimo de fusão do elo protegido, em toda faixa de seletividade. O fator 75% foi escolhido por levar em consideração pré-carregamento, temperatura ambiente e fusão parcial do elo fusível devido à correntes de curto-circuito de curta duração. Caso não haja interseção entre as curvas do elo fusível protegido e protetor, a seletividade completa é obtida. Entretanto, caso haja essa interseção, o valor da corrente associada à esse ponto será o limite para uma seletividade parcial (GÖNEN, 2008). Ou seja:

$$t_{\max\text{-interrup-Protetor}} \leq 0,75.t_{\min\text{-fusão-protetido}} \quad (2.31)$$

Onde:

$t_{\max\text{-interrup-Protetor}}$  : Tempo de máxima interrupção do elo fusível protetor;

$t_{\min\text{-fusão-protetido}}$  : Tempo de mínima fusão do elo fusível protegido.

O segundo método utiliza as tabelas de seletividade desenvolvida por fabricantes de elos fusíveis (GÖNEN, 2008). Este método é considerado mais conveniente para coordenação entre elos fusíveis, sendo portanto o mais empregado.

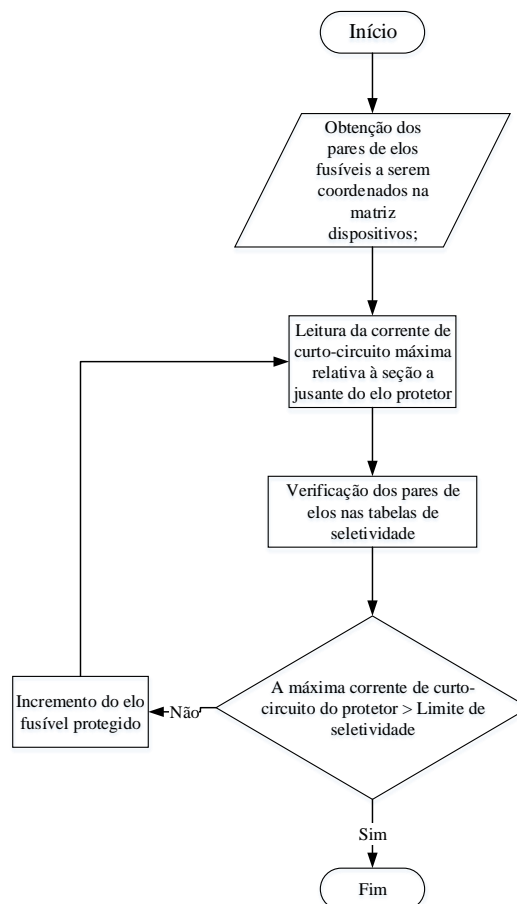
As tabelas de seletividade apresentadas em Gönen (2008) mostram a máxima corrente de falta na qual a seletividade entre elos fusíveis é garantida. Neste caso, os elos fusíveis são analisados em pares, sendo as tabelas baseadas no fator de compensação de 75% descrito pelo primeiro método. Assim, a determinação da curva de tempo total não é necessária, uma vez que

o valor máximo da corrente de curto-circuito para um determinado par de elos é fornecida pelas tabelas.

Na metodologia proposta, os pares de elos fusíveis a serem coordenados são obtidos por meio da matriz *Dispositivos*. Cada par elo possui um conjunto de seções a jusante associado, assim, as correntes de curto-circuito de interesse podem ser obtidas via matriz de Parâmetros e a seletividade verificada através das tabelas de seletividade, conforme mostrado no fluxograma da Figura 2.8.

Primeiramente, é realizada a determinação dos pares de elos fusíveis a serem coordenados, sendo o elo fusível protetor fixado. Posteriormente, é verificado se o valor da máxima corrente de curto-circuito na zona de proteção do elo fusível protetor não ultrapassa o limite de seletividade entre os elos fusíveis estabelecido na matriz de seletividade. Se a condição é verdadeira, a seletividade entre o par de elos fusíveis é garantida. Caso contrário, o elo protegido é substituído pelo elo imediatamente superior, conforme a lista de elos fusíveis preferenciais.

Figura 2.8 – Fluxograma do processo de verificação da seletividade e correção de elos fusíveis



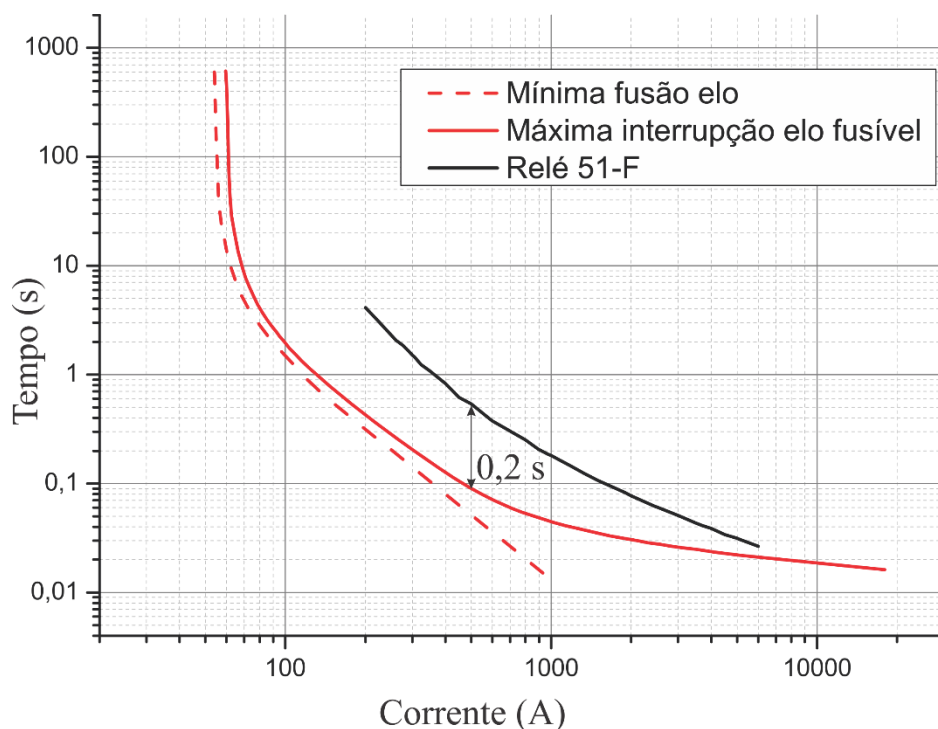
### 2.6.2.3.2 Seletividade Relé – Elo fusível

Segundo Gönen (2008), os intervalos de religamento do conjunto relé/disjuntor são maiores que os do religador. Portanto, quando um elo fusível é usado como dispositivo protegido ou de retaguarda, não haverá necessidade de compensação os efeitos de aquecimento e resfriamento causados no elo fusível considerado. Não é usual a utilização de elos fusíveis como dispositivo protegido em relação do relé, ou seja, instalado à montante. Por isso o estudo de coordenação será realizado somente para o caso do elo fusível instalado no lado da carga.

Para que a seletividade entre relé e elo fusível seja garantida, é necessário que o elo atue antes que o relé opere. Isso é realizado quando a curva temporizada (de fase ou terra) do relé esteja no mínimo 0,2 segundos acima da curva de tempo total do elo. Essa margem permite também considerar o tempo de sobrepercurso de relés eletromecânicos (ELETROBRÁS, 1982) (GÖNEN, 2008).

Neste trabalho, a diferença entre os polinômios obtidos para o relé e elos fusíveis fornece a região onde a diferença de tempo é igual ou menor que 0,2 segundos, como mostra a Figura 2.9 e (2.32).

Figura 2.9 – Seletividade Relé – Elo fusível



$$t_{relé}(i) - t_{max-int-elo}(i) \geq 0,2s \quad (2.32)$$

Em que:

$t_{relé}(i)$ : Tempo de atuação do relé de sobrecorrente para a corrente  $i$ ;

$t_{max-int-elo}(i)$ : Tempo de máxima interrupção do elo fusível para a corrente  $i$ ;

Ao garantir essa diferença de tempo entre a curva do relé e a curva de máxima interrupção do elo fusível, é possível verificar a coordenação entre os dispositivos para as correntes de curto-circuito de interesse.

### **2.6.2.3.3 Seletividade Relé – Religador**

A coordenação entre relé e religador normalmente ocorre quando o relé funciona como proteção de retaguarda, sendo instalado na subestação, e o religador instalado ao longo do alimentador. Quando o religador estiver alocado dentro da zona de proteção de um relé, é imprescindível garantir que os relés de fase ou neutro não operem durante a sequência de operação do religador até a eliminação da falta ou bloqueio do mesmo. Para garantir a correta operação, as curvas de operação dos relés devem ser escolhidas após a definição das curvas de operação do religador, levando sempre em conta os tempos de religamento do religador e o tempo de rearme dos relés. Portanto, um dos critérios para coordenação e seletividade entre relé e religador é a diferença de pelo menos 0,2 segundos entre as curvas dos relés de fase e neutro em relação às curvas do religador.

Um fator importante para a coordenação entre relé e religador é o tempo de rearme (para relés eletromecânicos) durante a sequência de operações do religador. Em relés eletromecânicos, este inicia o movimento do disco em direção aos contatos de operação, quando o religador está executando sua sequência de atuação. Se o tempo de rearme do relé não for ajustado corretamente, o disco do relé poderá continuar em uma posição avançada, consequência das operações do religador, resultando em uma falsa atuação do relé.



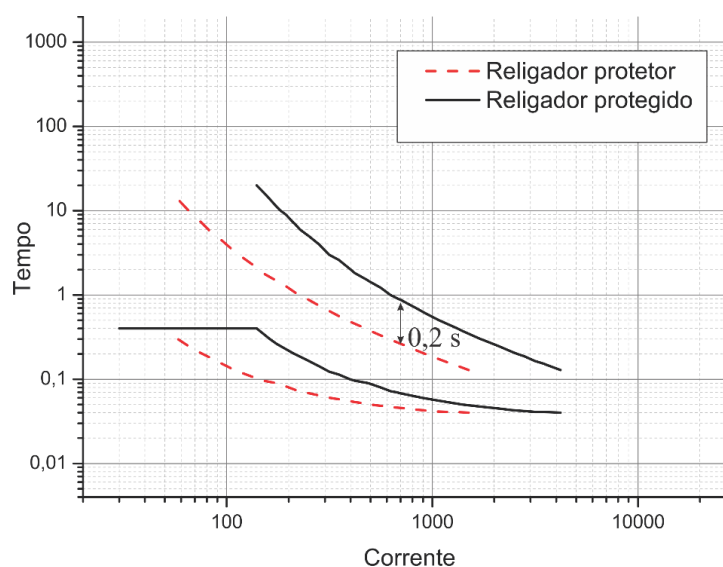
### 2.6.2.3.4 Coordenação Religador – Religador

Na coordenação religador – religador é preciso realizar a seleção adequada entre os diferentes tipos bobinas série (religadores hidráulicos) ou valores mínimos das correntes de disparo (religadores eletrônicos). Segundo Gönen (2008), religadores eletrônicos possuem uma família de curvas e vários valores disponíveis de correntes de atuação, fazendo com que estes sejam adaptáveis às necessidades para atingir a coordenação.

As curvas tempo x corrente dos dispositivos podem ser escolhidas de modo a fazer o melhor uso das atuações rápidas e temporizadas, sendo que os religadores podem ser programados para, em sua primeira sequência de atuação, operar rapidamente uma ou duas vezes, seguida de operações temporizadas.

Neste trabalho, o critério mais importante para a coordenação entre dois religadores, é a diferença de tempo entre suas curvas características. Todos os métodos de coordenação entre religadores consideram que, dois religadores em série, com curvas tempo x corrente separadas em menos de 0,033 segundos (2 ciclos) irão operar sempre simultaneamente. Caso essas curvas sejam separadas por um intervalo de tempo entre 0,033 segundos e 0,2 segundos (entre 2 e 12 ciclos), estes poderão operar simultaneamente. Caso as curvas sejam separadas por mais de 0,2 segundos (12 ciclos), os religadores não operarão simultaneamente. Na Figura 2.10 é ilustrado esse intervalo.

Figura 2.10 - Diferença entre curvas na coordenação religador – religador



Portanto, a coordenação entre dispositivos religadores é determinada através do conjunto de valores de corrente para o qual a diferença entre as curvas temporizadas dos religadores apresentam uma diferença de 0,2 segundos entre si.

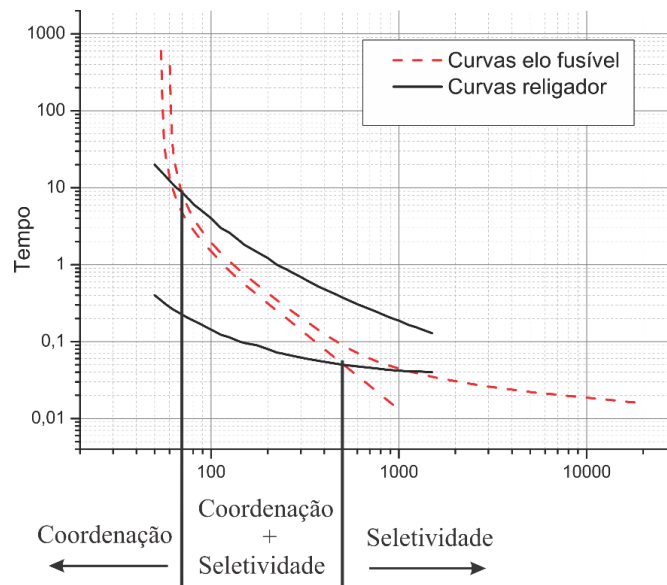
### **2.6.2.3.5 Coordenação Religador – Elo fusível**

Para ser obtida a coordenação entre religador e elo, é desejável que a corrente de curto-circuito monofásica mínima à jusante do elo seja maior que a corrente mínima de disparo de fase do religador. Porém, se essa condição não for satisfeita, a coordenação deverá ser garantida dentro da zona de proteção do religador. A melhor coordenação entre o religador e elos fusíveis é obtida ajustando o religador com duas operações rápidas e duas temporizadas.

A coordenação entre religador e elo fusível do lado da carga é realizada através das curvas tempo x corrente de ambos, e da análise das correntes limites de coordenação e as correntes de falta trifásica e fase-terra na zona de proteção do elo fusível. Isso é realizado determinando a interseção da curva de mínima fusão do elo fusível com a curva de operação rápida do religador, multiplicada por um fator K responsável por compensar os efeitos do pré-carregamento, temperatura ambiente e aquecimento do elo fusível, e a interseção entre a curva de máxima interrupção do elo fusível com a curva temporizada do religador multiplicada por 0,9. Para cada caminho mínimo haverá um coordenograma correspondente, compreendendo as curvas tempo x corrente dos dispositivos de proteção instalados no respectivo caminho, já ajustadas com os fatores correspondentes. Na Figura 2.11 é mostrado um coordenograma de coordenação entre religador e elo fusível e a respectiva zona de coordenação proporcionada pelos dispositivos.

Na coordenação entre esses dispositivos, é importante que, para todos os valores de curto-circuito possíveis, na zona de proteção do elo fusível, o tempo total de interrupção desse seja menor que o tempo mínimo de abertura do religador na curva temporizada. Isso evita a queima do elo fusível quando da ocorrência de uma falta temporária, permitindo que a operação temporizada do religador elimine a falta, restabelecendo o circuito.

Figura 2.11 - Zona de coordenação entre religador e elo fusível



## 2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentada uma metodologia híbrida para alocação, dimensionamento e coordenação de dispositivos de proteção em sistemas de distribuição de energia elétrica. O método consiste na utilização de regras heurísticas para alocação de elos fusíveis, simplificando assim o processo de determinação dos melhores locais para instalação destes. Estas regras buscam refletir as práticas utilizadas pelas empresas de energia, sendo estas já consolidadas nos sistemas de distribuição das mesmas. A alocação dos dispositivos religadores é determinada através de um processo de otimização que busca minimizar a duração e frequência das interrupções permanentes, bem como de interrupções temporárias. A solução é determinada utilizando um algoritmo de enxame de partículas. Seguido da alocação desses dispositivos, os mesmos são dimensionados e coordenados, fornecendo uma solução que combina todos os aspectos relativos ao projeto de sistemas de proteção.

### **3 MÉTODO PARA REDUÇÃO DA INFLUÊNCIA DE FONTES DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA COORDENAÇÃO RELIGADOR – ELO FUSÍVEL**

#### **3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS**

Neste capítulo é mostrada a metodologia de solução proposta para o problema da descoordenação entre religadores e elos fusíveis resultante da adição de geração distribuída. A metodologia consiste em determinar os melhores locais para instalação de limitadores de corrente de falta. O problema é formulado considerando a minimização da diferença de corrente em situações com e sem geração distribuída e também a dimensão dos mesmos. A busca pela solução é realizada utilizando o algoritmo de enxame de partículas multiobjetivo. Juntamente com a alocação dos limitadores de corrente, são sugeridas alterações nas filosofias de proteção dos religadores, considerando a utilização do sistema de proteção seletivo ou coordenado, dependendo da contribuição da geração distribuída.

#### **3.2 INFLUÊNCIA DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Geração distribuída consiste em unidades de geração de energia elétrica próximas aos centros de carga, conectadas às redes de média e baixa tensão. A instalação dessas fontes em sistemas de distribuição de energia elétrica traz inúmeros benefícios, tais como: melhor continuidade de serviço, redução de perdas técnicas, redução da emissão de gases do efeito estufa, entre outros (BEGOVIĆ et al., 2001) (MORANDI, 2013) (TANG e IRAVANI, 2005). Entretanto, a inserção da GD provoca a alteração do paradigma operativo dos SDEE. O nível de penetração da GD e o tipo de conexão desta com o SDEE (máquinas rotativas diretamente acopladas à rede, tais como geradores síncronos ou de indução ou conectadas através de conversores com limitação de corrente eletrônica) causam um impacto fundamental no sistema de proteção, visto que estes alteram o nível da corrente de curto-circuito. Os impactos fundamentais da inserção da GD em um SDEE são: modificações nas correntes de falta, falha na sensibilidade de dispositivos de proteção (GEIDL, 2005), redução no alcance de relés de sobrecorrente e de distância (*blinding of protection*), bidirecionalidade da corrente de falta resultando em má atuação da proteção (*sympathetic tripping*), ilhamento não intencional da

### Capítulo 3 – Redução da Influência da GD na Coordenação Religador – Elo Fusível

GD, descoordenação entre relé, religador e elos fusíveis, causando falha no esquema de proteção coordenado (GEIDL, 2005).

#### **3.2.1 Influência da geração distribuída na coordenação de dispositivos de proteção**

Em um sistema de distribuição, os dispositivos de proteção são alocados e coordenados seguindo uma série de diretrizes estabelecidas, como visto no Capítulo 2. Porém, com o avanço das tecnologias de redes inteligentes, esses SDEE devem estar preparados para acomodar fontes de GD instaladas próximas aos centros de consumo. Porém, a inserção da GD provoca efeitos negativos nos sistemas de proteção já dimensionados e coordenados para o cenário tradicional.

Diversos autores têm tratado o problema da descoordenação entre religadores e elos fusíveis em SDEE com GD. Entre estas soluções, é comum o desenvolvimento de metodologias adaptativas, que buscam alterar os ajustes de dispositivos de proteção em tempo real, para que estes mantenham o funcionamento original quando há inserção de GD (BRAHMA e GIRGIS, 2003), (HUSSAIN et al., 2013), (SHAH, BHALJA, 2014). Outros autores procuram limitar a penetração da GD para que o valor da corrente de curto-circuito seja mantida dentro da zona de coordenação e seletividade (CHAITUSANEY e YOKOYAMA, 2008), (NAIEM et al., 2012).

Uma solução que tem apresentado um desenvolvimento crescente é a utilização de limitadores de corrente de falta (LCF) para reduzir a contribuição da GD quando há ocorrência de faltas, com o intuito de não alterar as configurações preestabelecidas dos dispositivos de proteção (GUARDA, 2012), (LIM et al., 2012), (KIM et al., 2012), (MAHMOUDIAN et al., 2017).

#### **3.2.2 Limitadores de corrente de falta**

Os dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito têm a finalidade de limitar as correntes de falta em valores adequados às especificações nominais de instalações existentes.

Os limitadores de corrente de falta são dispositivos de baixa impedância durante as condições de operação normal do sistema elétrico, não produzindo efeito algum. Entretanto, durante um curto-circuito, ele rapidamente insere uma alta impedância em série com a rede, de modo a limitar a corrente em um valor pré-definido.

Para redes de transmissão e distribuição, LCF supercondutores e de estado sólido são tecnologias emergentes. O desenvolvimento de tais dispositivos está sendo financiada por

### Capítulo 3 – Redução da Influência da GD na Coordenação Religador – Elo Fusível

governos de diversos países no mundo. Cada tipo de LCF possui uma série de vantagens e desvantagens, cabendo ao usuário encontrar o que mais se adequa aos seus propósitos.

Em conceito, todos os tipos de limitadores de corrente podem ser vistos como uma chave normalmente fechada em paralelo com um resistor. O tipo de chave, seu circuito controlador e o tipo de resistor variam de acordo com o fabricante.

Considerando sua forma de operação, esses limitadores podem ser divididos em dois grupos:

- Utilização de características não-lineares do material limitador. Quando uma corrente muito alta flui pelo material limitador, sua resistência aumenta, o que causa a limitação da corrente;
- Utilização de chaveamento em alta velocidade composto por tiristores de potência.

#### 3.2.2.1 Limitadores de corrente de falta de estado sólido

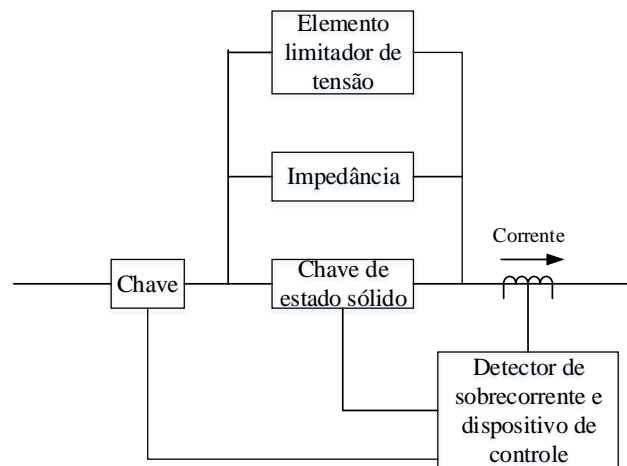
A utilização de Limitadores de Corrente de Estado Sólido (LCES) oferece uma solução viável às redes de transmissão e distribuição. Proporcionando uma limitação de corrente quase instantânea, o LCES reduz as correntes de falta tanto em dispositivos à montante quanto à jusante. Para interromper a corrente, o LCES rapidamente insere um elemento consumidor de energia (ex: resistor, indutor) em série no circuito de modo a limitar a corrente de falta. Além de limitar a corrente de falta, o LCES serve também como um limitador de correntes de *inrush* (energização de transformadores).

Um LCES oferece as seguintes vantagens:

- Limitar a corrente de falta;
- Limitar a corrente de *inrush*, até mesmo para cargas capacitivas;
- Operações repetidas com alta confiabilidade e quase nenhum desgaste;
- Melhoria da qualidade de energia no que diz respeito aos efeitos dos curtos-circuitos para rede.

Estes dispositivos consistem em chaves de alta velocidade composta por tiristores e uma impedância limitadora em paralelo. Um detector de corrente envia um sinal para a comutação dos tiristores, fazendo com que a impedância limitadora seja inserida em série com o sistema, reduzindo drasticamente a corrente, como mostrado na Figura 3.1. Todo o processo ocorre na faixa de 1 ms (GEIDL, 2005).

Figura 3.1 – Limitador de corrente de falta de estado sólido



### 3.2.2.2 Limitadores de corrente de falta supercondutores

Os avanços realizados na área dos supercondutores permitiram que limitadores de corrente de falta pudessem utilizar essa tecnologia e também serem competitivos em relação ao custo. Na operação deste dispositivo, a resistividade do elemento limitador de corrente, que é mantido no estado supercondutor, é nula. Durante uma situação de curto-circuito, a transição do estado supercondutor para limitante é quase instantânea. Porém, pode-se citar a fragilidade do material supercondutor, uma necessidade de um sistema de refrigeração constante e eficiente, de modo que o dispositivo limitante se mantenha no estado supercondutor (em torno de  $-126^{\circ}\text{C}$ ).

Esses limitadores podem ser divididos em dois grupos: Resistivos e indutivos. Nos dois casos, o princípio de operação mantém-se o mesmo: durante a operação normal do sistema, o material limitador é mantido no estado supercondutor, o que faz com que sua impedância chegue à zero. O LCFSC é extremamente sensível às variações de temperatura, devendo ser devidamente dimensionado para que não haja o sobreaquecimento do mesmo e a consequente perda de sua característica supercondutora.

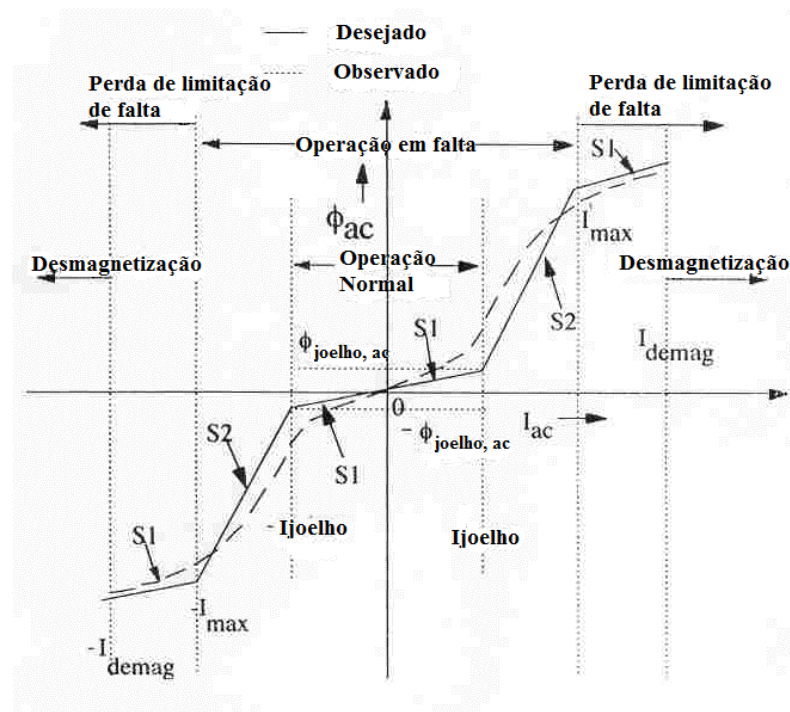
Quando sujeito a uma corrente de falta, o LCFSC tem sua temperatura elevada, saindo então do estado supercondutor e oferecendo uma alta resistência e consequentemente limitando a corrente de curto-circuito.

### 3.2.2.3 Limitadores de corrente de falta magnéticos

O limitador de corrente magnético é um dispositivo formado por um núcleo laminado e um ímã permanente entre os pólos. O circuito a ser protegido é ligado em série com a bobina.

O ímã permanente é impressado entre o núcleo saturável e é usado para saturar o núcleo em condições normais de operação. A direção da força magnetomotriz e a corrente alternada é aditiva no núcleo 1 e subtrativa no núcleo 2 ao mesmo tempo. Durante condições normais de operação, onde a corrente de operação é baixa, ambos os núcleos estão saturados, fazendo com que a impedância efetiva do sistema seja baixa. Durante uma falta, o alto valor das correntes forçam os núcleos a saírem da saturação. Então a indutância não saturada de um dos núcleos em combinação com a indutância saturada do outro núcleo restringe o fluxo da alta corrente de falta. A Figura 3.2 mostra o ponto de operação de um núcleo baseado nas características B-H do ímã permanente e núcleo. Para saturar o núcleo de ferrite, este deve ter um valor baixo de densidade de fluxo de saturação se comparado com o ímã permanente

Figura 3.2 – Curva de histerese do limitador de corrente magnético



O dispositivo limitador magnético possui um indutor em série com o circuito, o qual apresenta uma impedância mesmo com o sistema em funcionamento normal. Dependendo do



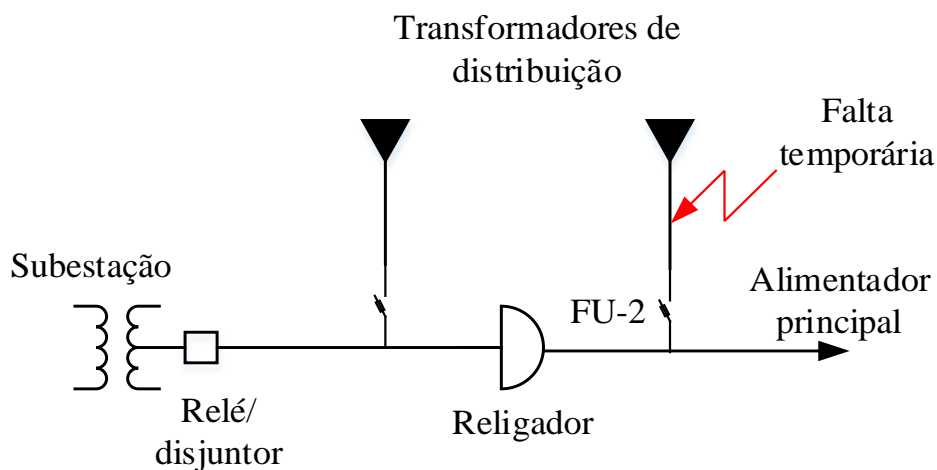
Capítulo 3 – Redução da Influência da GD na Coordenação Religador – Elo Fusível

sistema elétrico em que será aplicado, essa impedância poderá ter influência e causar problemas na operação, sendo necessária a consideração de outro tipo de limitador para aplicação.

3.3 PROBLEMA DE ALOCAÇÃO DE LIMITADORES DE CORRENTE DE FALTA PARA REDUÇÃO DA DESCOORDENAÇÃO RELIGADOR – ELO FUSÍVEL EM SDEE COM GD

Considerando um sistema de proteção coordenado, mostrado na Figura 3.3, após ser sensibilizado por uma falta, o religador irá atuar na sua curva rápida. Visto que a falta é temporária, esta será eliminada quando o dispositivo reconectar o circuito, evitando a atuação do elo fusível (*fuse saving*).

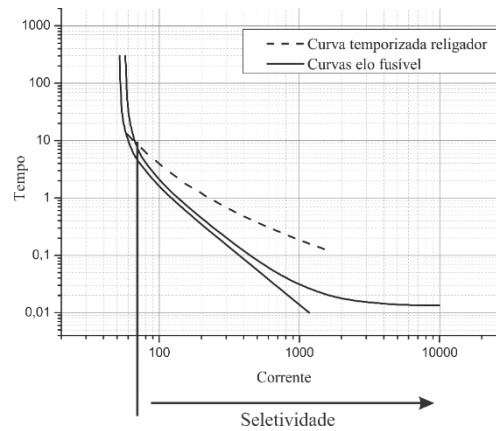
Figura 3.3 – Coordenação entre dispositivos de proteção



Quando o sistema de proteção é seletivo, o dispositivo mais próximo da falta deverá ser sempre o primeiro a operar, independente da natureza da falta (temporária ou sustentada). O diagrama de seletividade é mostrado na Figura 3.4.

*Capítulo 3 – Redução da Influência da GD na Coordenação Religador – Elo Fusível*

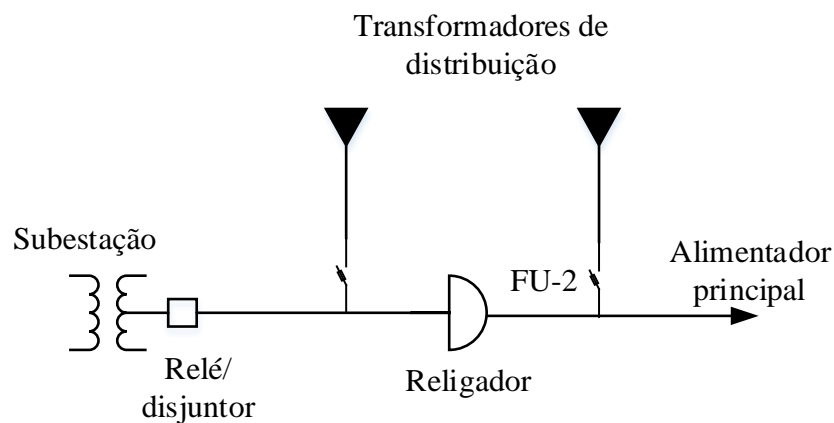
Figura 3.4 – Operação seletiva dos dispositivos de proteção



Neste caso é possível notar a operação do elo fusível FU-2, mesmo para faltas temporárias, o que desconectará apenas os consumidores localizados à sua jusante.

A Figura 3.5 mostra um alimentador radial tradicional, consistindo na troncal principal e ramais que alimentam as cargas. O sistema de proteção é composto por um conjunto relé/disjuntor na subestação, religador e elos fusíveis protegendo os ramais.

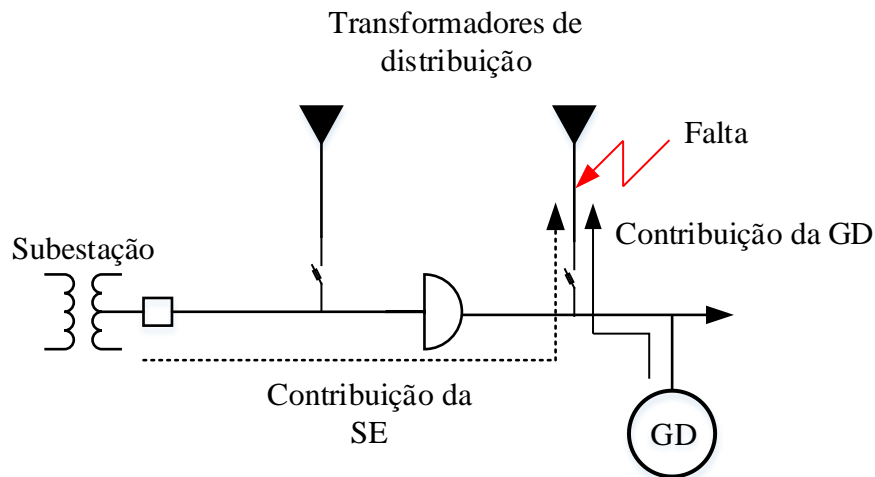
Figura 3.5 – Configuração tradicional do sistema de distribuição radial



Com a inserção de uma fonte de GD (gerador síncrono diretamente acoplado), a corrente de falta será a soma das contribuições da subestação e da GD, como mostrado na Figura 3.6.

Capítulo 3 – Redução da Influência da GD na Coordenação Religador – Elo Fusível

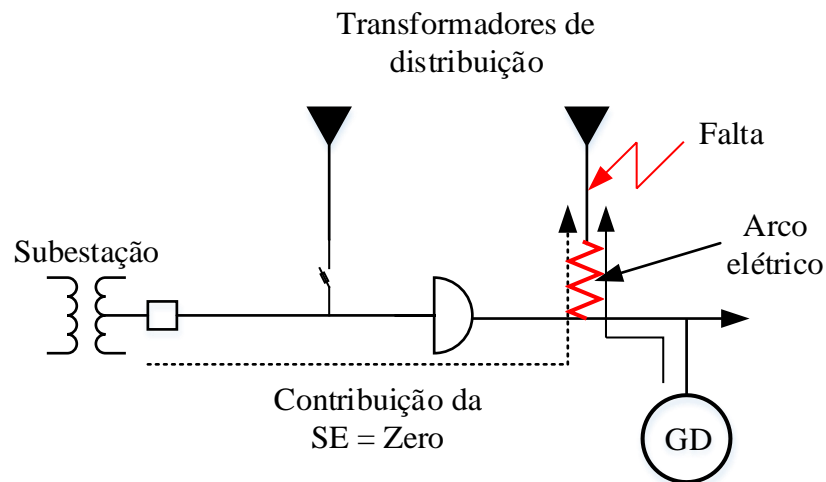
Figura 3.6 – Contribuições para a corrente de falta



Os métodos encontrados na literatura afirmam solucionar o problema de descoordenação religador – elo fusível através da alocação de limitadores de corrente de falta (CHAITUSANEY e YOKOHAMA, 2008) (NAIEN et al., 2012). Porém, os autores não consideram a continuidade da contribuição da GD no caso de uma falta temporária e operação rápida do religador. Visto que os arcos elétricos normalmente são extinguidos após uma breve interrupção das contribuições, o religamento instantâneo é comumente aplicado. Com uma GD conectada à rede, um problema é notado quando esta é automaticamente reconectada após uma operação rápida do religador. A falta pode não ter sido extinguida, visto que o arco elétrico foi alimentado pela GD, portanto, o religamento instantâneo pode não ser bem sucedido (GEIDL, 2007).

Um tempo de religamento estendido deve ser considerado entre a separação da unidade de GD e a reconexão do sistema de distribuição para garantir a extinção da falta. Os tempos de religamento comumente considerados estão entre 100 e 1000 ms (GEIDL, 2007). Considerando esses tempos, a GD continuará a contribuir para a falta durante as operações rápidas do religador, fazendo com que a eliminação da falta não seja bem sucedida (DUGAN, McDERMOTT, 2002). Na Figura 3.7 é ilustrado esse problema.

Figura 3.7 – Má operação do elo fusível devido à contribuição da GD



Com o intuito de evitar a operação rápida do religador e a consequente má operação do elo fusível, é imprescindível que a filosofia de operação considerada para o religador seja alterada de coordenada para seletiva, e que esta contribuição extra provinda da GD não afete a seletividade entre elos fusíveis. Então, para resolver esse problema, é proposto nesse trabalho uma metodologia para alocação de limitadores de corrente de falta para reduzir a influência da GD na coordenação religador – elo fusível, bem como estabelecer a filosofia operacional do religador (coordenado ou seletivo), visando a manutenção de um nível aceitável de confiabilidade.

#### 3.4 MÉTODO PARA ALOCAÇÃO DE LIMITADORES DE CORRENTE DE FALTA USANDO ALGORITMO DE ENXAME DE PARTÍCULAS MULTIOBJETIVO

Primeiramente, um estudo de curto-circuito é realizado em todos os nós do sistema. Este cálculo preliminar será referência no processo de otimização. Então, o número, alocação e especificação das fontes de GD que podem ser conectados a qualquer nó do sistema é realizado, permitindo quaisquer combinações. Considerando todas as GD conectadas, um novo estudo de curto-circuito é realizado, determinando as novas correntes de falta no sistema.

As funções objetivo modeladas para o problema de alocação de limitadores de corrente de falta buscam minimizar a diferença entre as correntes de falta que sensibilizam os elos fusíveis antes e depois da conexão da GD, com o intuito de eliminar violações de seletividade entre os elos. Também, a dimensão dos limitadores de corrente deverá ser minimizada, com o

Capítulo 3 – Redução da Influência da GD na Coordenação Religador – Elo Fusível

objetivo de redução de custos, visto que o custo desses dispositivos é diretamente proporcional à impedância do mesmo. As funções objetivo consideradas são mostradas em (3.1) e (3.2).

$$\begin{aligned} \min f_1 = & \sum_{n=1}^{n_{\text{elos\_protetores}}} |I_{\text{protetor\_GD}_n} - I_{\text{protetor\_SemGD}_n}| + \\ & + \sum_{p=1}^{n_{\text{elos\_protegidos}}} |I_{\text{protegido\_GD}_p} - I_{\text{protegido\_SemGD}_p}| \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\min f_2 = \sum_{k=1}^{n_{LCF}} (R_k + X_k) \quad (3.2)$$

Onde:

$n_{\text{elos\_protetores}}$  : Número de elos fusíveis protetores;

$I_{\text{protetor\_GD}_n}$  : Corrente de falta no  $n$ -ésimo elo fusível protetor, considerando GD;

$I_{\text{protetor\_SemGD}_n}$  : Corrente de falta no  $n$ -ésimo elo fusível protetor, sem GD;

$n_{\text{elos\_protegidos}}$  : Número de elos fusíveis protegidos;

$I_{\text{protegido\_GD}_p}$  : Corrente de falta no  $p$ -ésimo elo fusível protegido, considerando GD;

$I_{\text{protegido\_SemGD}_p}$  : Corrente de falta no  $p$ -ésimo elo fusível protegido, sem GD;

$n_{LCF}$  : Número de limitadores de corrente de falta;

$R_k, X_k$ : Resistência e reatância do  $k$ -ésimo limitador de corrente de falta, respectivamente;

### 3.2.2.1 Restrições do problema de alocação de limitadores de corrente de falta

As restrições do problema foram elaboradas de modo a refletirem limites técnicos e econômicos, buscando limitar a solução à uma região factível. As restrições consideradas são mostradas em (3.3), (3.4), (3.5) e (3.6).

$$I_{i,GD} - I_{i,SemGD} \leq Tol \quad (3.3)$$

$$X_{\min} \leq X_{LCF} \leq X_{\max} \quad (3.4)$$

Capítulo 3 – Redução da Influência da GD na Coordenação Religador – Elo Fusível

$$R_{\min} \leq R_{LCF} \leq R_{\max} \quad (3.5)$$

$$(I_{protetor\_k} \cdot J_{protegido\_k}) \leq I_{seletividade\_k} \quad (3.6)$$

Onde:

$I_{i,GD}$ : Corrente na  $i$ -ésima seção do alimentador, considerando a GD;

$I_{i,SemGD}$ : Corrente na  $i$ -ésima seção do alimentador, antes da conexão da GD;

$Tol$ : Tolerância admitida para a diferença entre as correntes antes e após a conexão da GD;

$X_{LCF}$ : Reatância do limitador de corrente de falta;

$X_{\min}$ ,  $X_{\max}$ : Limites para a reatância do limitador de corrente de falta;

$R_{LCF}$ : Resistência do limitador de corrente de falta;

$R_{\min}$ ,  $R_{\max}$ : Limites para a resistência do limitador de corrente de falta;

$I_{protetor\_k}$ : Corrente de falta seletiva no elo fusível protetor  $k$ ;

$I_{protegido\_k}$ : Corrente de falta seletiva no elo fusível protegido  $k$ ;

$I_{seletividade\_k}$ : Corrente limite para seletividade entre elo fusível protetor  $k$  e elo fusível protegido  $k$ .

A restrição (3.3) afirma que a diferença entre as correntes de falta na seção  $i$  do alimentador, com e sem GD deve ser inferior a uma tolerância pré-estabelecida. As restrições (3.4) e (3.5) limita o dimensionamento do limitador de corrente de falta entre valores máximos e mínimos de reatância e resistência, respectivamente. A restrição (3.6) é relacionada com o limite de seletividade entre elos fusíveis, que deve ser atendida.

### 3.4.1 Método de solução: Algoritmo de enxame de partículas multiobjetivo

Para solucionar problemas com múltiplos objetivos, as soluções de Pareto (não-dominadas) devem ser maximizada. Uma solução de Pareto é aquela que não pode ser melhorada com relação a qualquer objetivo sem que exista piora para pelo menos algum outro objetivo. No algoritmo de enxame de partículas multiobjetivo, é necessário decidir como selecionar as partículas, dando preferências àquelas não dominadas e como manter a diversidade do enxame. A lógica de implementação do algoritmo de enxame de partículas multiobjetivo é mostrado na Figura 3.8.

Capítulo 3 – Redução da Influência da GD na Coordenação Religador – Elo Fusível

O contador de tempo é inicializado ( $t=0$ ) e um enxame de  $n$  partículas é criado aleatoriamente (3.7). Também são geradas aleatoriamente as velocidades associadas a todas as partículas (3.8).

$$Part_j(0), p = 1, \dots, n_p \quad (3.7)$$

$$Vel_j(0), p = 1, \dots, n_p \quad (3.8)$$

Cada partícula inclui valores para as variáveis de controle, resistência e reatância de cada alocação de limitador de corrente possível.

Então os limitadores de corrente determinados por uma partícula são inseridos no sistema. É realizado um estudo de curto-circuito considerando a impedância inserida dos limitadores de corrente e também a GD. Após esse cálculo, os valores das funções objetivo (3.1) e (3.2) são determinados.

Uma busca é realizada pelas soluções não-dominadas para montar o conjunto  $\{SND_g\}$ , composto pelas soluções não-dominadas globais. O melhor membro de  $\{SND_g\}$  é selecionado como a melhor solução global. Nesta etapa, o conjunto externo de soluções não-dominadas será  $SND_g(0)$ .

O contador de tempo é atualizado ( $t=t+1$ ). São também atualizados a inércia, a velocidade e posição de cada partícula. A posição atualizada da  $j$ -ésima partícula é adicionada ao conjunto  $SND_L(t)$ , que reúne as soluções não-dominadas locais. Caso a dimensão de  $SND_L(t)$  exceda um tamanho limite, este conjunto é reduzido utilizando o *Hierarchical Clustering Algorithm* (CHEN et al., 2009). É realizada a união de todos os conjuntos de soluções não-dominadas para produzir o conjunto global de soluções não-dominadas  $SND_g(t)$ . Caso a dimensão de  $SND_g(t)$  exceda o limite, este conjunto é reduzido também através do *Hierarchical Clustering Algorithm*.

São copiados então os membros de  $SND_g(t)$  para o conjunto externo de Pareto. Caso o número de membros do conjunto de Pareto exceda o limite, este é reduzido através do *Hierarchical Clustering Algorithm*.

Capítulo 3 – Redução da Influência da GD na Coordenação Religador – Elo Fusível

São medidas então as distâncias individuais entre os membros de  $SND_L(t)$ . Os membros de  $SND_L(t)$  e  $SND_g(t)$  que fornecem a menor distância são selecionados como melhores soluções locais e globais. Se o critério de parada for satisfeito, o algoritmo é finalizado.

A determinação das soluções não-dominadas é realizada através do *Naive and slow approach* (KUMAR e MINZ, 2014). Nesta abordagem, cada solução é comparada com as demais no espaço de soluções. As soluções não são consideradas não-dominadas caso um membro é dominado por qualquer outro membro remanescente. Caso contrário, a solução é parte do conjunto de soluções não-dominadas.

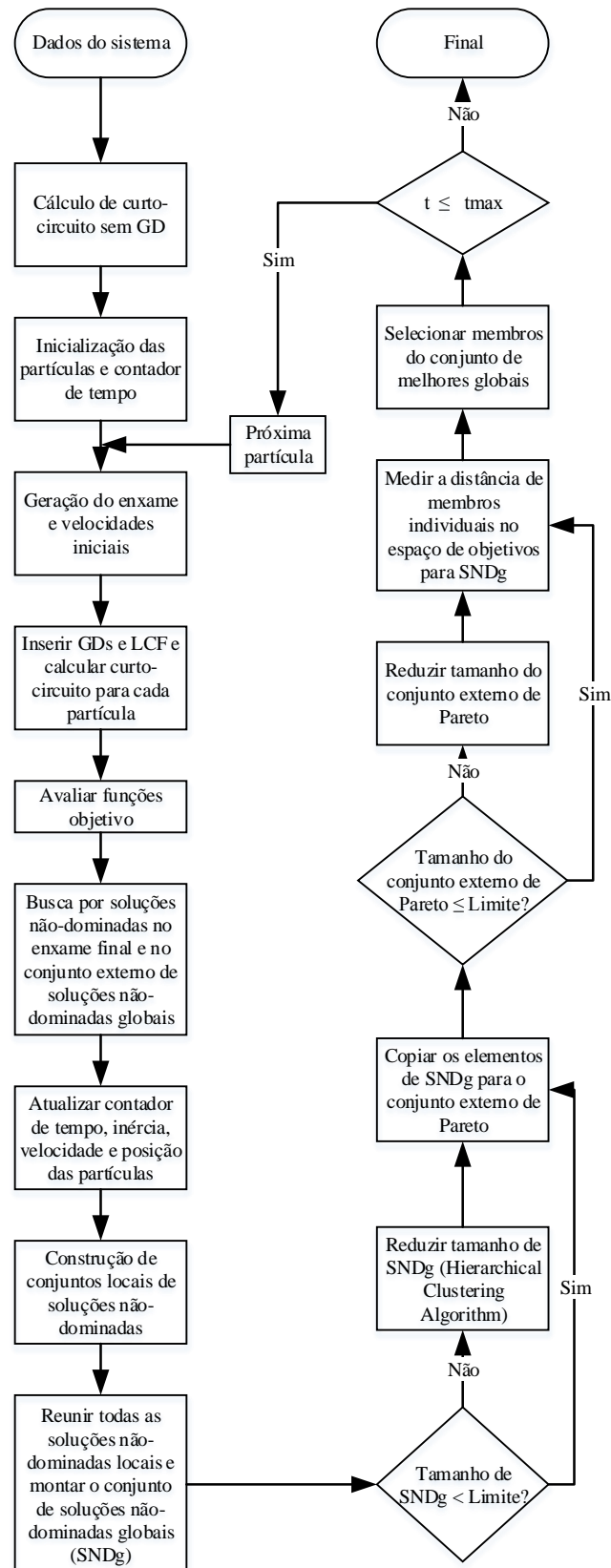
O processo *Naive and slow approach* segue os seguintes passos:

- $SND_L = \{\emptyset\}$ ;
- Selecionar uma solução  $x_i$  do espaço de soluções;
- Para cada solução  $x_j \in Soluções$ , onde  $x_i \neq x_j$ 
  - Caso solução  $x_i$  é melhor que  $x_j$ , então:
  - $SND_L = SND_L \cup \{x_i\}$
- $x_i = x_i + 1$



*Capítulo 3 – Redução da Influência da GD na Coordenação Religador – Elo Fusível*

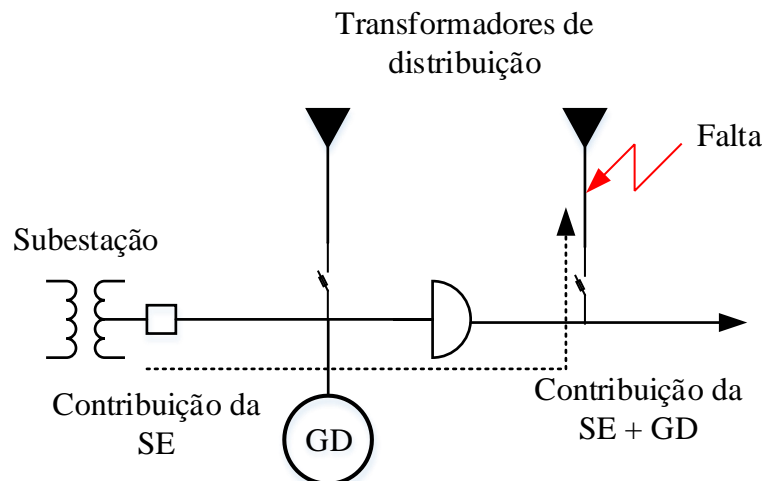
Figura 3.8 – Fluxograma do algoritmo de enxame de partículas multiobjetivo



### 3.4.2 Filosofia operacional do religador

Para determinar se a curva rápida do religador deve ser habilitada (sistema coordenado) ou desabilitada (sistema seletivo), a posição da GD deve ser investigada. Como visto na Figura 3.4, quando a GD está localizada a jusante do religador, e uma falta ocorre entre ambos, poderá haver a má operação do elo fusível ou a impossibilidade de interrupção do arco elétrico devido à contribuição da GD, inutilizando a aplicação do sistema de proteção coordenado. Para solucionar esse problema, a alteração da filosofia de proteção do religador para seletivo é sugerida, desabilitando a curva rápida e permitindo a atuação do elo fusível, desconectando apenas os consumidores à jusante deste. A Figura 3.9 mostra uma situação diferente, onde a GD é localizada à montante do religador. Neste caso, haverá um aumento considerável da corrente de falta em defeitos à jusante do religador, causando a descoordenação religador – elo fusível. Nesse caso, o problema foi solucionado através da alocação de limitadores de corrente de falta e a manutenção do sistema de proteção coordenado.

Figura 3.9 – Contribuição para corrente de falta da subestação e GD localizada à montante do religador



### 3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentada uma metodologia para reduzir os efeitos causados pelas fontes de geração distribuída na coordenação religador – elo fusível. A prática atual desenvolvida por diversos autores consiste na alocação de limitadores de corrente de falta para reduzir as

Capítulo 3 – Redução da Influência da GD na Coordenação Religador – Elo Fusível

correntes de falta para a zona de coordenação e seletividade delimitada pelas curvas tempo x corrente dos dispositivo de proteção. Porém, não é endereçada a contribuição da geração distribuída durante a operação rápida do religador, quando ocorre uma falta entre esses. A metodologia desenvolvida determina a alocação e dimensionamento de limitadores de corrente de falta para eliminar violações de seletividade entre elos fusíveis e também reduzir a contribuição extra da geração distribuída quando estas estão localizadas à montante dos religadores. Ainda, o método inclui a sugestão de alteração da filosofia de operação dos religadores em sistemas com geração distribuída, evitando assim que a contribuição destas seja responsável pela manutenção do arco elétrico na falta, mantendo um nível aceitável de confiabilidade na utilização do sistema de proteção seletivo.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos tanto pela metodologia híbrida para alocação de dispositivos de proteção desenvolvida, quanto para a solução do problema da descoordenação religador – elo fusível, através da alocação de limitadores de corrente de falta. Os métodos foram testados em dois sistemas IEEE (34 nós, 37 nós).

### 4.2 ALOCAÇÃO DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

Os sistemas IEEE 34 e 37 nós são mostrados nas Figuras 4.1 e 4.2, respectivamente. Os dados desses sistemas podem ser encontrados em IEEE (1991).

Ao aplicar a metodologia híbrida proposta para alocação de dispositivos de proteção, obtém-se a alocação e indicadores de continuidade mostrados nas Tabelas 4.1 e 4.2, respectivamente. Os tempos de restabelecimento e as taxas de falha consideradas foram obtidas juntamente à concessionária RGE Sul e são mostrados na Tabela 4.3.

Figura 4.1 – Sistema Teste IEEE 34 nós

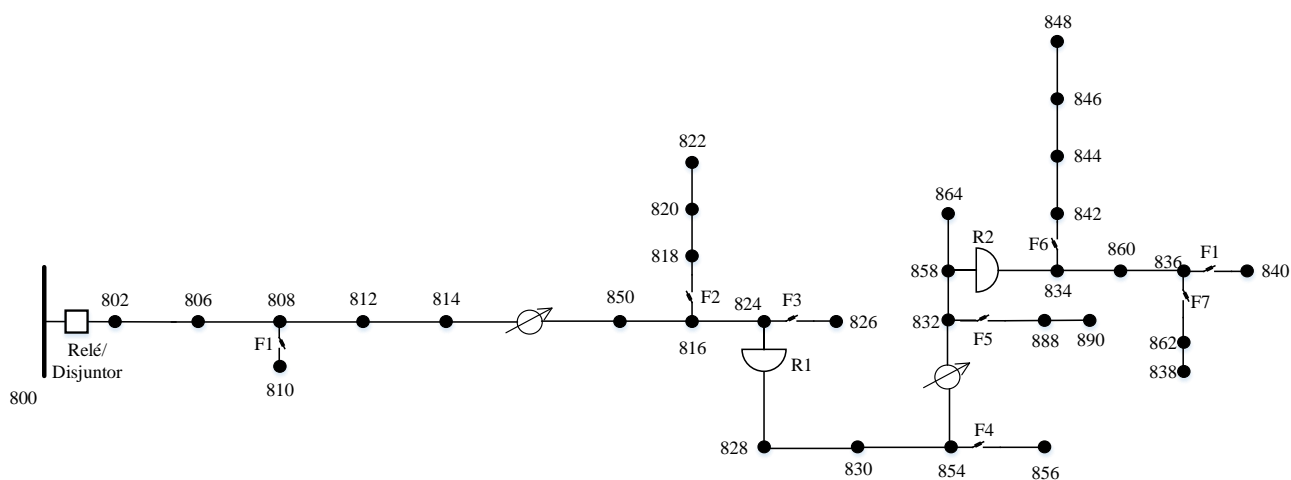


Figura 4.2 – Sistema Teste IEEE 37 nós

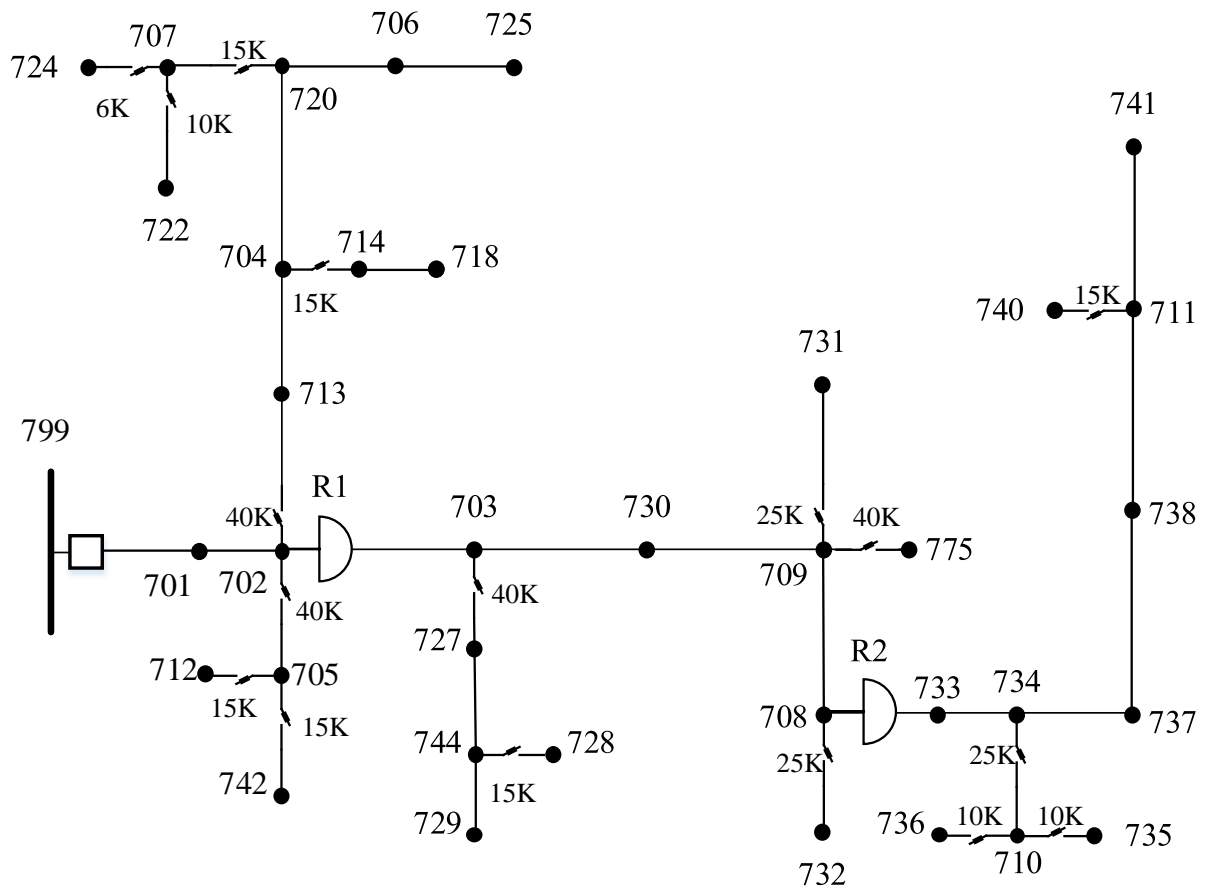


Tabela 4.1 – Alocação dos dispositivos de proteção

Sistema	Relé/disjuntor	Religadores	Elos fusíveis
IEEE 34 nós	800 - 802	824 – 828; 858 – 834.	808 – 810; 816 – 818; 824 – 826; 832 – 888; 858 – 864; 834 – 842; 836 – 862.
IEEE 37 nós	799-701	702 – 703; 708 – 733.	702 – 705; 702-713; 703-727; 704 – 714; 720 – 707; 707 – 722; 707 – 724; 705 – 712; 705 – 742; 709-731; 744 – 728; 708- 732; 734-710; 711-740; 710 – 735; 710 – 736.

Tabela 4.2 – Indicadores de continuidade obtidos para os sistemas teste considerados

Sistema	DEC	DECe	FEC	FECe	MAIFe	MAIFe_e
<b>IEEE 34 nós</b>	8,35	8,00	10,1	10,00	12,36	12,00
<b>IEEE 37 nós</b>	8,03	8,00	9,13	10,00	12,15	12,00

Tabela 4.3 – Tempos médios de reparo e taxas de falha consideradas nos sistemas teste

Sistema	TMR (horas) Elo-fusível	TMR (horas) Religador	$\lambda$ (falhas/km.ano)	$\gamma$ (falhas/km.ano)
<b>IEEE 34 nós</b>	0,819	1,2	0,21	0,30
<b>IEEE 37 nós</b>	0,819	1,2	0,18	0,32

Os tempos médios de reparo são referentes ao tempo necessário para realizar o reparo da rede na zona de proteção do elo fusível e religador.

#### 4.3 REDUÇÃO DA DESCOORDENAÇÃO RELIGADOR – ELO FUSÍVEL EM SDEE COM GD

Com a proteção do SDEE devidamente projetada, dimensionada e coordenada, é considerada a inserção de 3 fontes de GD para determinação da posição e dimensão dos limitadores de corrente de falta a serem alocados, sendo consideradas todas as combinações de GD. Os dados referentes aos geradores distribuídos acoplados à rede através de um transformador elevador são mostrados na Tabela 4.4. Primeiramente foi realizada uma busca exaustiva considerando todas as combinações de GD, considerando a inserção dessas em todos os nós do sistema, com o intuito de validar o método proposto, visto que na literatura não são encontrados trabalhos que compreendem as premissas desenvolvidas nesse trabalho.

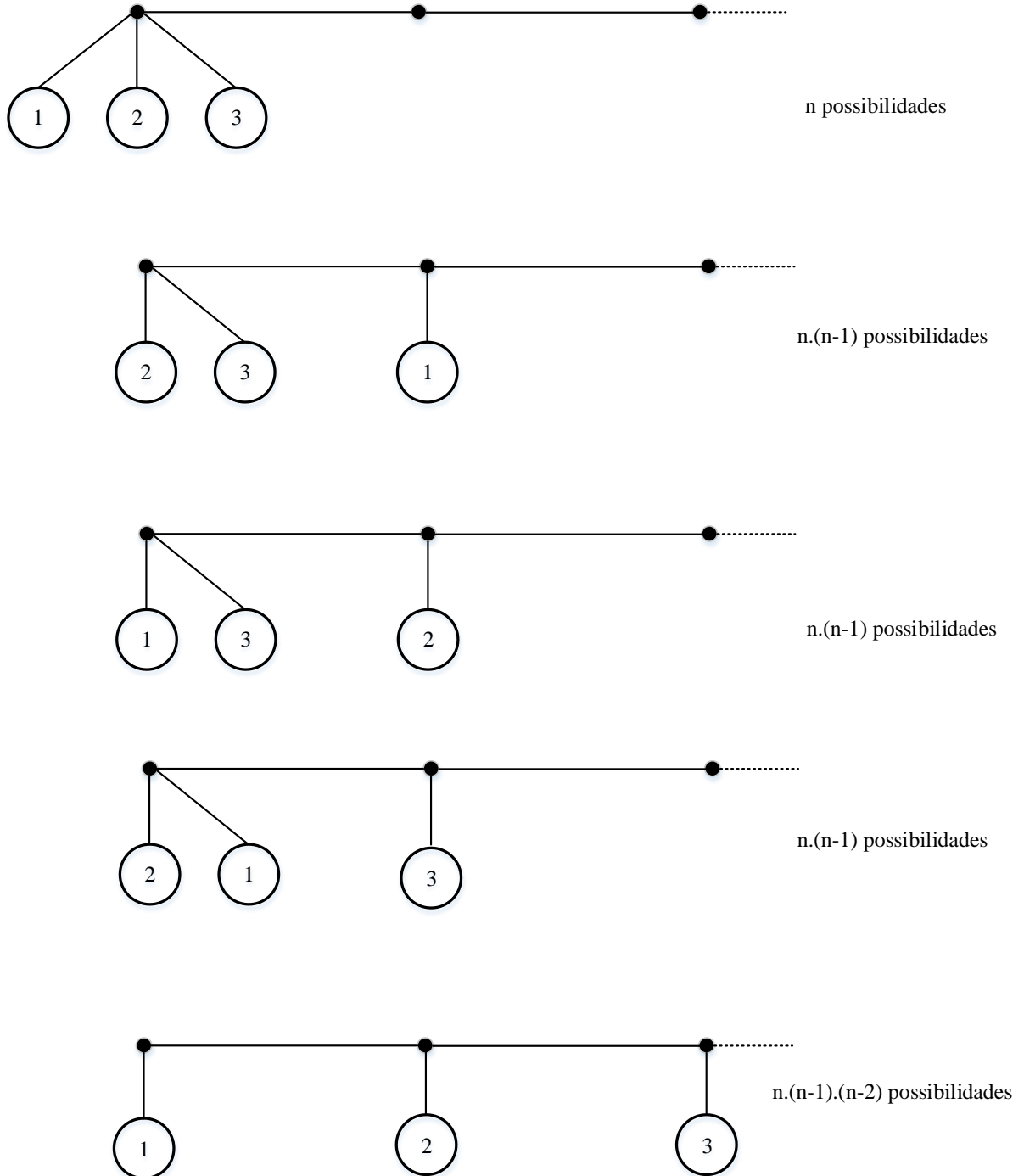
Tabela 4.4 – Dados dos geradores distribuídos (JENKINS et al., 2010)

<b>Parâmetro</b>	<b>Dados</b>
<b>Potência</b>	2 MVA
<b>Reatância em regime permanente (<math>X_s</math>)</b>	2,95%
<b>Reatância transitória (<math>X'_d</math>)</b>	0,25%
<b>Reatância transitória (<math>X''_d</math>)</b>	0,17%
<b>Constante de tempo transitória de curto-circuito de eixo direto (<math>T'_d</math>)</b>	0,47
<b>Constante de tempo subtransitória de curto-circuito de eixo direto (<math>T''_d</math>)</b>	0,054
<b>Transformador Elevador</b>	5%, 4,16kV /480 V
<b>Tensão base</b>	4,16 kV
<b>MVA base</b>	100 MVA

Na Figura 4.3 são mostradas as possibilidades de combinações de conexão consideradas na busca exaustiva.

No sistema IEEE 34 nós, são possíveis 39304 combinações, considerando a disponibilidade de 3 fontes de GD a serem inseridas no sistema. Para o sistema IEEE 37 nós, são possíveis 50653 combinações diferentes. O algoritmo de busca exaustiva considera cada uma dessas combinações e determina a alocação e dimensionamento dos LCF, bem como a filosofia operacional do religador para cada situação. Considerando que foi permitido à busca exaustiva finalizar os cálculos para todas as combinações, o resultado encontrado por essa é considerado ótimo. Para cada combinação de GD são calculados os valores das funções objetivo. Na Figura 4.4 é mostrado o resultado da alocação de limitadores de corrente para a busca exaustiva para fontes de GD instaladas nos nós 840, 848 e 856. Essa configuração foi escolhida devido aos pontos de instalação serem mais afastados da SE. Na Tabela 4.5 são mostradas as filosofias de proteção para os religadores em três situações de falta. A busca exaustiva variou a resistência e reatância dos limitadores em intervalos de 0,01  $\Omega$  para determinação dos valores dos limitadores de corrente.

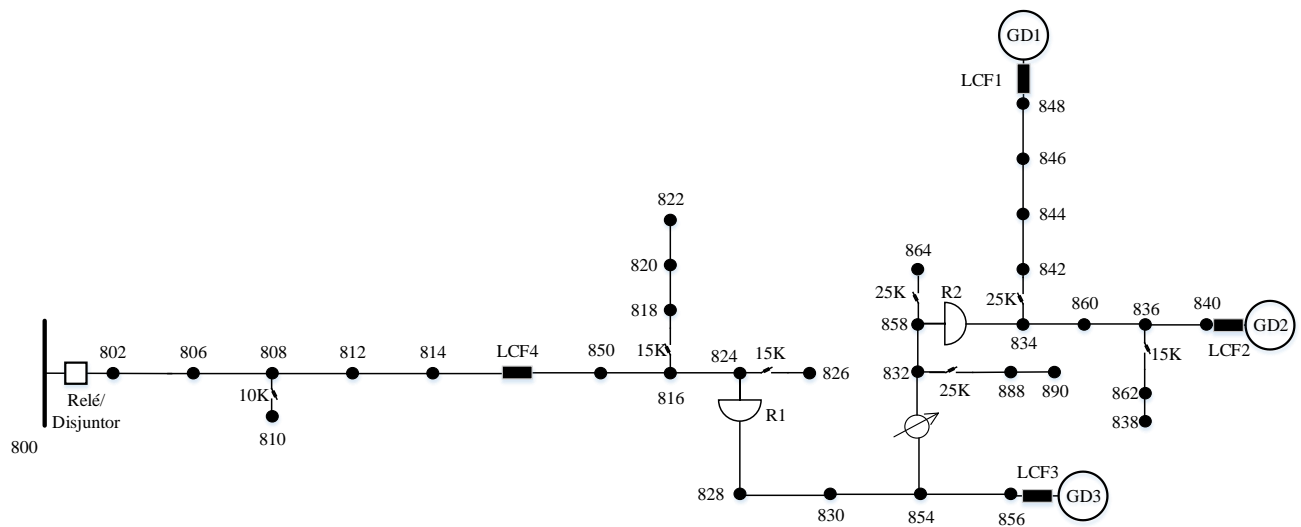
Figura 4.3 – Possibilidades de combinações de fontes de GD conectadas consideradas na busca exaustiva



Fonte: Autor.



Figura 4.4 – Resultado da busca exaustiva para a alocação de limitadores de corrente para o sistema IEEE 34 nós



A Tabela 4.5 mostra o comparativo da alocação e dimensionamento dos limitadores de corrente de falta obtidos pela busca exaustiva e pelo método proposto. Na Tabela 4.6 as filosofias operacionais dos religadores são mostradas para diferentes pontos de falta.

Tabela 4.5 – Comparação dos resultados da busca exaustiva e do método proposto para o sistema IEEE 34 nós

Caso	Combinação de GD	Alocação LCF - BE	Dimensão LCF - BE ( $\Omega$ )	Alocação LCF - MP	Dimensão LCF - MP ( $\Omega$ )
1	GD1	GD1 – 848 814 – 850	$j0,68$ $0,23+j0,31$	GD1 – 848 814 – 850	$j0,65$ $0,2+j0,32$
2	GD2	GD2 – 840 814 – 850	$j0,88$ $0,23+j0,31$	GD2 – 840 814 – 850	$j0,85$ $0,2+j0,32$
3	GD3	GD3 – 856 814 – 850	$j0,29$ $0,23+j0,31$	GD3 – 856 814 – 850	$j0,26$ $0,2+j0,32$
4	GD1 + GD2	GD1 – 848 GD2 – 840 814 – 850	$j0,68$ $j0,88$ $0,23+j0,31$	GD1 – 848 GD2 – 840 814 – 850	$j0,65$ $j0,85$ $0,2+j0,32$

Tabela 4.5 (cont.) – Comparação dos resultados da busca exaustiva e do método proposto para o sistema IEEE 34 nós

Caso	Combinação de GD	Alocação LCF - BE	Dimensão LCF - BE ( $\Omega$ )	Alocação LCF - MP	Dimensão LCF - MP ( $\Omega$ )
5	GD2 + GD3	GD2 – 840	j0,89	GD2 – 840	j0,85
		GD3 – 856	j0,29	GD3 – 856	j0,26
		814 – 850	0,23+j0,31	814 – 850	0,2+j0,32
6	GD1 + GD3	GD1 – 848	j0,68	GD1 – 848	j0,65
		GD3 – 856	j0,29	GD3 – 856	j0,26
		814 – 850	0,23+j0,31	814 – 850	0,2+j0,32
7	GD1 + GD2 + GD3	GD1 – 848	j0,68	GD1 – 848	j0,65
		GD2 – 840	j0,88	GD2 – 840	j0,85
		GD3 – 856	j0,29	GD3 – 856	j0,26
		814 – 850	0,23+j0,31	814 – 850	0,2+j0,32

Tabela 4.6 – Filosofia de proteção dos religadores para o sistema teste IEEE 34 nós, considerando faltas em pontos distintos (metodologia desenvolvida).

Caso	Combinação de GD	Ponto de falta (838)	Ponto de falta (864)	Ponto de falta (822)
1	GD1	R1: Seletivo R2: Seletivo	R1: Seletivo R2: Seletivo	R1: Coordenado R2: Coordenado
2	GD2	R1: Seletivo R2: Seletivo	R1: Seletivo R2: Seletivo	R1: Coordenado R2: Coordenado
3	GD3	R1: Coordenado R2: Coordenado	R1: Seletivo R2: Coordenado	R1: Coordenado R2: Coordenado
4	GD1 + GD2	R1: Coordenado R2: Seletivo	R1: Seletivo R2: Coordenado	R1: Coordenado R2: Coordenado
5	GD2 + GD3	R1: Coordenado R2: Seletivo	R1: Seletivo R2: Coordenado	R1: Coordenado R2: Coordenado

Tabela 4.6 (cont.) – Filosofia de proteção dos religadores para o sistema teste IEEE 34 nós, considerando faltas em pontos distintos (metodologia desenvolvida).

Caso	Combinação de GD	Ponto de falta (838)	Ponto de falta (864)	Ponto de falta (822)
6	GD1 + GD3	R1: Coordenado R2: Seletivo	R1: Seletivo R2: Coordenado	R1: Coordenado R2: Coordenado
7	GD1 + GD2 + GD3	R1: Seletivo R2: Seletivo	R1: Seletivo R2: Coordenado	R1: Coordenado R2: Coordenado

Para o sistema teste IEEE 37 nós, a Figura 4.5 mostra a alocação de limitadores de corrente de falta obtida pela busca exaustiva, para a situação onde as posições de instalação das fontes de GD são os nós 725, 729, 741. Na Tabela 4.7 encontra-se o comparativo entre o método desenvolvido e a metodologia proposta, e na Tabela 4.8, as filosofias sugeridas para os religadores.

É possível notar que os locais determinados pelo método proposto são os mesmos obtidos na busca exaustiva. Os valores dos limitadores de corrente variaram minimamente, afetando pouco a corrente responsável por sensibilizar os elos fusíveis.

Figura 4.5 – Alocação de limitadores de falta obtida pela busca exaustiva para o sistema IEEE 37 nós

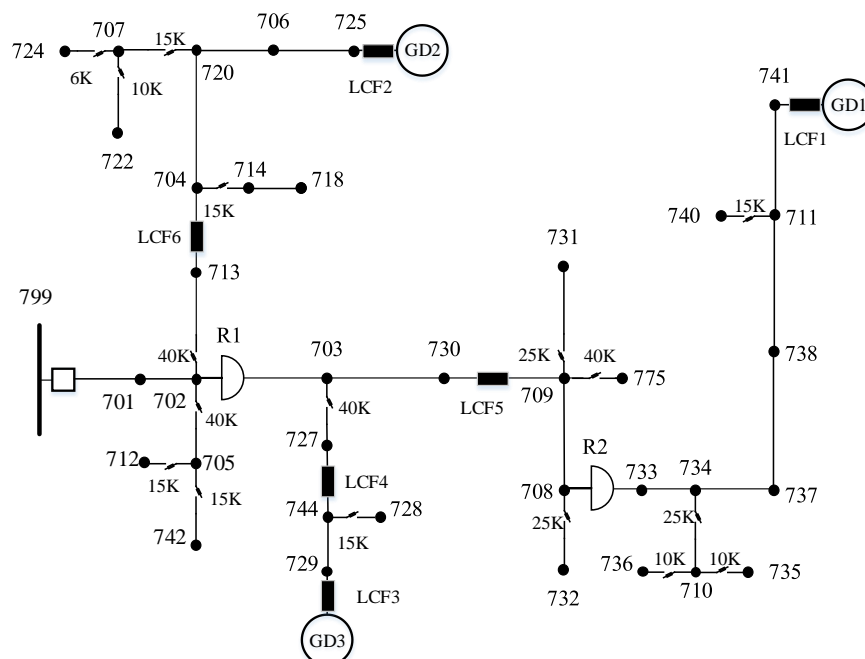


Tabela 4.7 – Comparação dos resultados da busca exaustiva e do método proposto para o sistema IEEE 37 nós.

<b>Caso</b>	<b>Combinação de GD</b>	<b>Alocação LCF - BE</b>	<b>Dimensão LCF – BE (pu)</b>	<b>Alocação LCF - MP</b>	<b>Dimensão LCF – MP (pu)</b>
1	GD1	GD1 - 741; 730-709	j0,45; 0,43+j0,28	GD1 - 741; 730-709	j0,48; 0,48+j0,32
2	GD2	GD2 - 725; 730-709	0,12+j0,23; 0,43+j0,28	GD2 - 725; 730-709	0,1+j0,28; 0,48+j0,32
3	GD3	GD3 - 729; 730-709	0,28+j0,35; 0,43+j0,28	GD3 - 729; 730-709	0,3+j0,36; 0,48+j0,32
4	GD1 + GD2	GD1 - 741; GD2 - 725; 730-709; 704-713	j0,45; 0,12+j0,23; 0,43+j0,28 0,13+j0,24	GD1 - 741; GD2 - 725; 730-709; 704-713	j0,48; 0,1+j0,28; 0,48+j0,32 0,15+j0,22
5	GD2 + GD3	GD2 - 725; GD3 - 729; 730-709; 704-713; 727-744	0,12+j0,23; 0,28+j0,35; 0,43+j0,28; 0,13+j0,24; 0,18+j0,37	GD2 - 725; GD3 - 729; 730-709; 704-713; 727-744	0,1+j0,28; 0,3+j0,36; 0,48+j0,32; 0,15+j0,22; 0,2+j0,35
6	GD1 + GD3	GD1 - 741; GD3 - 729; 727-744; 730-709;	j0,45; 0,28+j0,35; 0,18+j0,37; 0,43+j0,28	GD1 - 741; GD3 - 729; 727-744; 730-709;	j0,48; 0,3+j0,36; 0,2+j0,35; 0,48+j0,32
7	GD1 + GD2 + GD3	GD1 - 741; GD2 - 725; GD3 - 729; 704-713; 730-709; 727-744	j0,45; 0,12+j0,23; 0,28+j0,35; 0,13+j0,24; 0,43+j0,28; 0,18+j0,37	GD1 - 741; GD2 - 725; GD3 - 729; 704-713; 730-709; 727-744	j0,48; 0,1+j0,28; 0,3+j0,36; 0,15+j0,22; 0,48+j0,32; 0,2+j0,35

Tabela 4.8 – Filosofia de proteção do religador para o sistema teste IEEE 37 nós, considerando faltas em pontos distintos (metodologia desenvolvida).

<b>Caso</b>	<b>Combinação de GD</b>	<b>Ponto de falta (728)</b>	<b>Ponto de falta (740)</b>	<b>Ponto de falta (775)</b>
1	GD1	R1: Seletivo R2: Coordenado	R1: Coordenado R2: Seletivo	R1: Coordenado R2: Seletivo
2	GD2	R1: Coordenado R2: Coordenado	R1: Coordenado R2: Coordenado	R1: Coordenado R2: Coordenado
3	GD3	R1: Seletivo R2: Coordenado	R1: Seletivo R2: Coordenado	R1: Coordenado R2: Coordenado
4	GD1 + GD2	R1: Seletivo R2: Coordenado	R1: Coordenado R2: Seletivo	R1: Seletivo R2: Coordenado
5	GD2 + GD3	R1: Seletivo R2: Coordenado	R1: Coordenado R2: Coordenado	R1: Seletivo R2: Coordenado
6	GD1 + GD3	R1: Seletivo R2: Coordenado	R1: Coordenado R2: Seletivo	R1: Seletivo R2: Coordenado
7	GD1 + GD2 + GD3	R1: Seletivo R2: Seletivo	R1: Coordenado R2: Seletivo	R1: Seletivo R2: Seletivo

A Tabela 4.9 mostra a comparação dos valores das correntes de curto-circuito originais, o incremento devido à inserção da GD e a redução provocada pela inserção dos limitadores de corrente para todos as combinações de GD da solução factível obtida pela busca exaustiva e pela metodologia proposta para o sistema teste IEEE 37 nós. Pode-se notar que a seletividade entre os elos fusíveis foi mantida considerando a alocação e o dimensionamento dos limitadores de corrente de falta obtidos ao final do processo de busca. Esses valores de corrente de falta são tomados como referência para validação do método proposto, bem como as dimensões dos limitadores e a filosofia operacional dos religadores.

Tabela 4.9 – Comparação de seletividade entre elos fusíveis no sistema IEEE 37 nós

<b>Caso</b>	<b>Dispositivos</b>	<b>Ifalta original</b>	<b>Ifalta com GD</b>	<b>Limite</b>	<b>Ifalta com GD e LCF - BE</b>	<b>Ifalta com GDs e LCF - MP</b>
<b>A</b>	702 – 713 (40K) 704 – 714 (15K)	879 A	1275 A	1100 A	958 A	965 A
<b>B</b>	702 – 713 (40K) 720 – 707 (15K)	785 A	1167 A	1100 A	931 A	935 A
<b>C</b>	720 – 707 (15K) 707 – 722 (10K)	236 A	483 A	300 A	263 A	265 A
<b>D</b>	702 – 723 (40K) 720 – 707 (15K)	965 A	1325 A	1100 A	976 A	980 A
<b>E</b>	720 – 707 (15K) 707 – 724 (6K)	465 A	730 A	510 A	479 A	482 A
<b>F</b>	702 – 705 (40K) 705 – 712 (15K)	875 A	1235 A	1100 A	924 A	930 A
<b>G</b>	702 – 705 (40K) 705 – 742 (15K)	822 A	1120 A	1100 A	898 A	903 A
<b>H</b>	703 – 727 (40K) 744 – 728 (15K)	930 A	1183 A	1100 A	938 A	942 A
<b>I</b>	734 – 710 (25K) 710 – 736 (10K)	480 A	630 A	540 A	507 A	512 A
<b>J</b>	734 – 710 (25K) 710 – 736 (10K)	435 A	585 A	540 A	479 A	485 A

Na Figura 4.6 é possível verificar que, para um curto-circuito no ponto 838 e a GD1 fornecendo potência, a inserção do LCF reduz com sucesso a corrente total de falta. Porém, durante a operação rápida do religador, GD1 mantém sua contribuição, causando a fadiga e possível atuação do elo fusível. Portanto é necessária a retificação da filosofia de proteção do religador, permitindo a atuação do elo fusível e assim desconectando o menor número de consumidores. Os tempos de atuação dos dispositivos nesse caso são mostrados na Tabela 4.10.

Figura 4.6 – Coordenograma para um curto-circuito no ponto 838 do sistema IEEE 34 nós

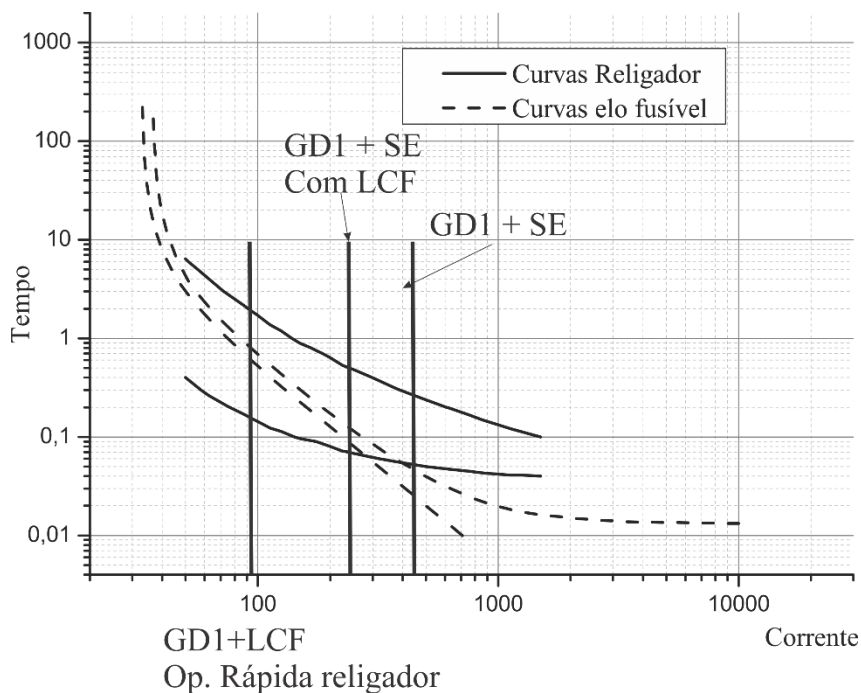


Tabela 4.10 – Tempos de operação dos dispositivos no sistema IEEE 37 nós para um curto-circuito no ponto 838 considerando GD1

Caso	Atuação elo fusível (s)	Operação rápida religador (s)	Operação lenta do religador (s)
GD1 + SE	0,058	0,046	0,28
GD1 + SE + LCF	0,13	0,068	0,52
GD1+LCF (op. Rápida)	0,86	-	2,01

Na Figura 4.7 é possível notar que, com a inserção dos limitadores de corrente de falta, a proteção nesse ponto manterá sua coordenação, podendo ambos religadores manterem o esquema de proteção coordenado, não havendo o risco de atuação indevida do elo fusível devido a operações rápidas dos religadores para faltas temporárias, considerando a posição de instalação de GD2. A instalação de LCF atenua a contribuição de GD2 para a falta, permitindo a manutenção do sistema de proteção original. Na Tabela 4.11 são mostrados os tempos de atuação dos dispositivos para o caso considerado.

Figura 4.7 – Coordenograma de um curto-circuito no ponto 740 do sistema IEEE 37 nós

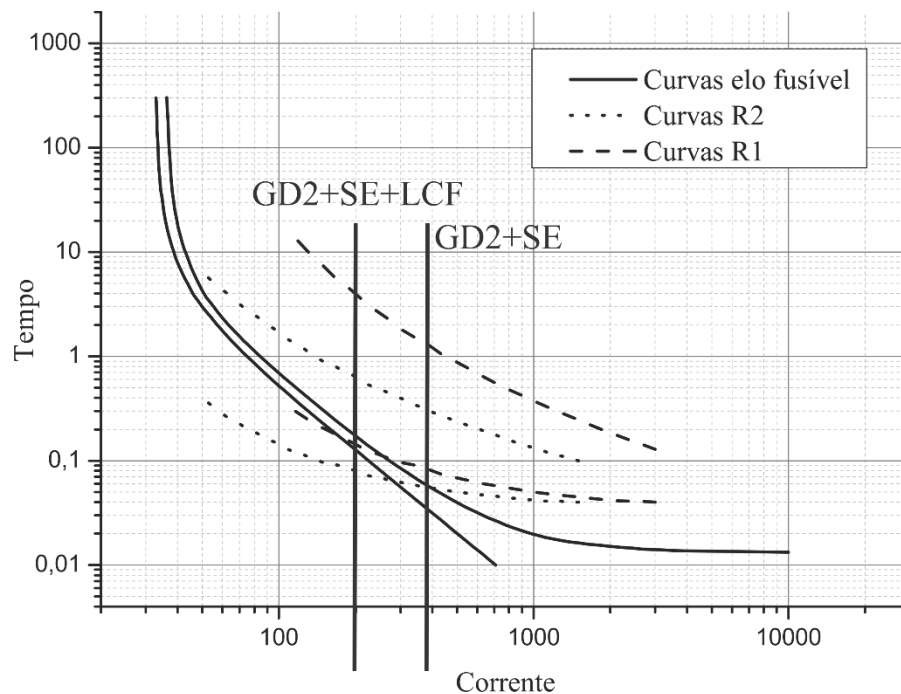


Tabela 4.11 – Tempos de operação dos dispositivos no sistema IEEE 37 nós para um curto-circuito no ponto 740 considerando GD2.

<b>Caso</b>	<b>Atuação elo fusível (s)</b>	<b>Operação rápida de R2 (s)</b>	<b>Operação lenta de R2 (s)</b>
GD2 + SE	0,062	0,058	0,31
GD2 + SE + LCF	0,18	0,081	0,61



*Capítulo 4 – Resultados*

Nas Figuras 4.8 a 4.16 são mostrados todos os coordenogramas de seletividade para os diferentes casos considerados.

Figura 4.8 – Coordenograma para o caso A

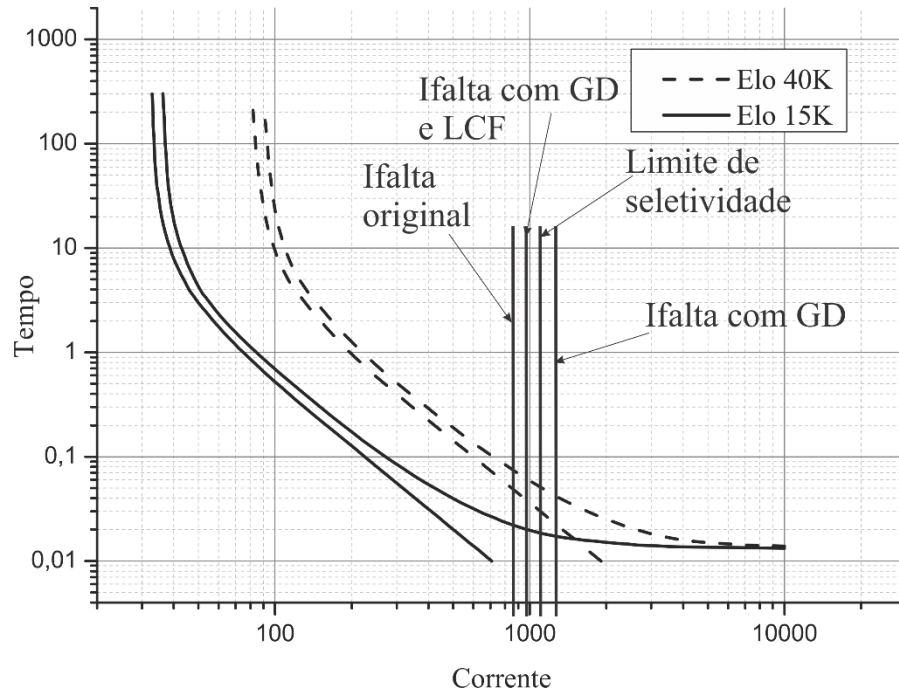


Figura 4.9 – Coordenograma para o caso B

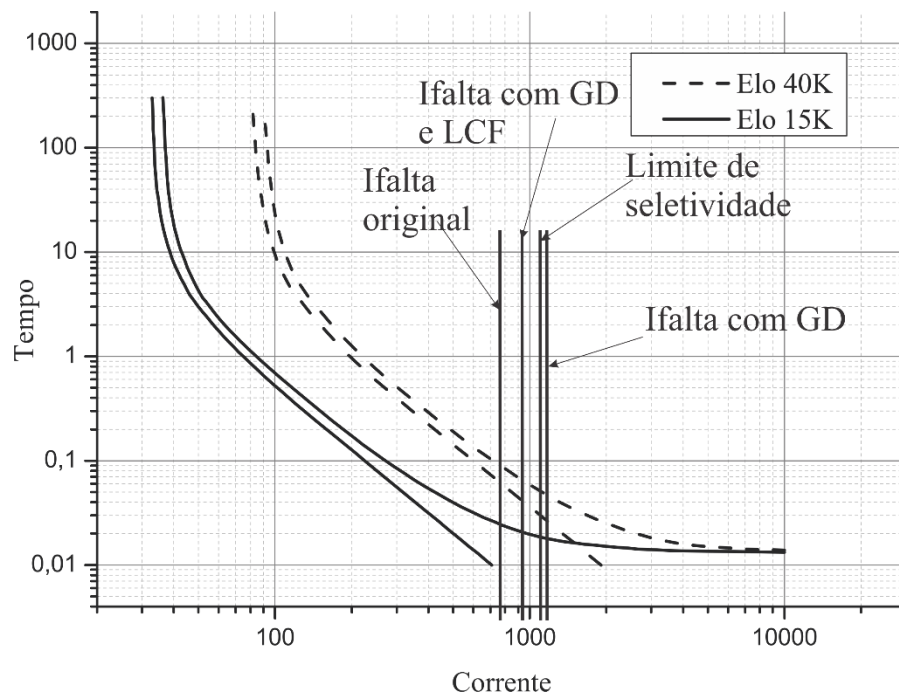


Figura 4.10 – Coordenograma para o caso C

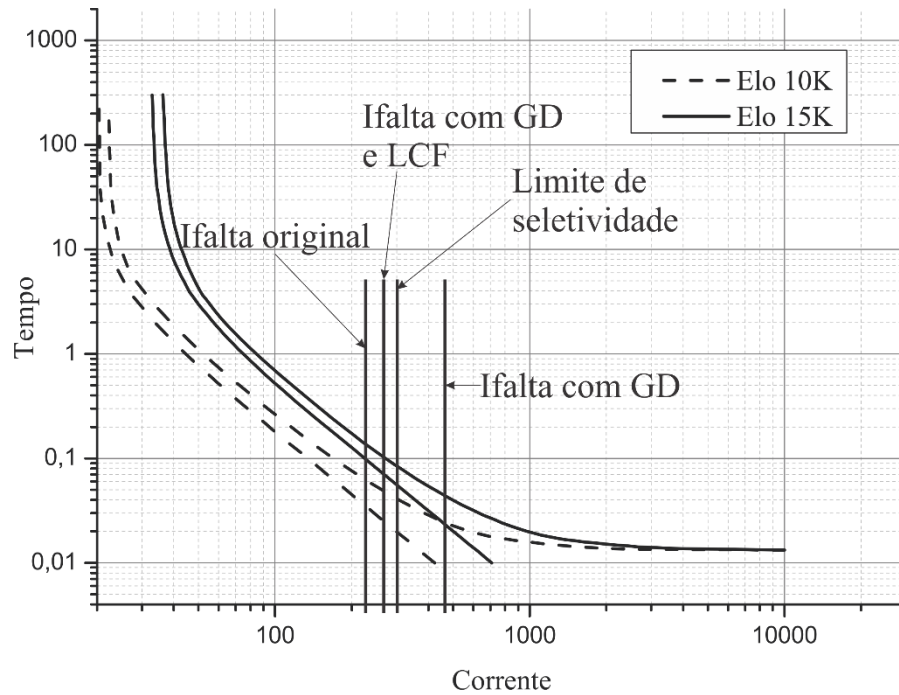


Figura 4.11 – Coordenograma para o caso D

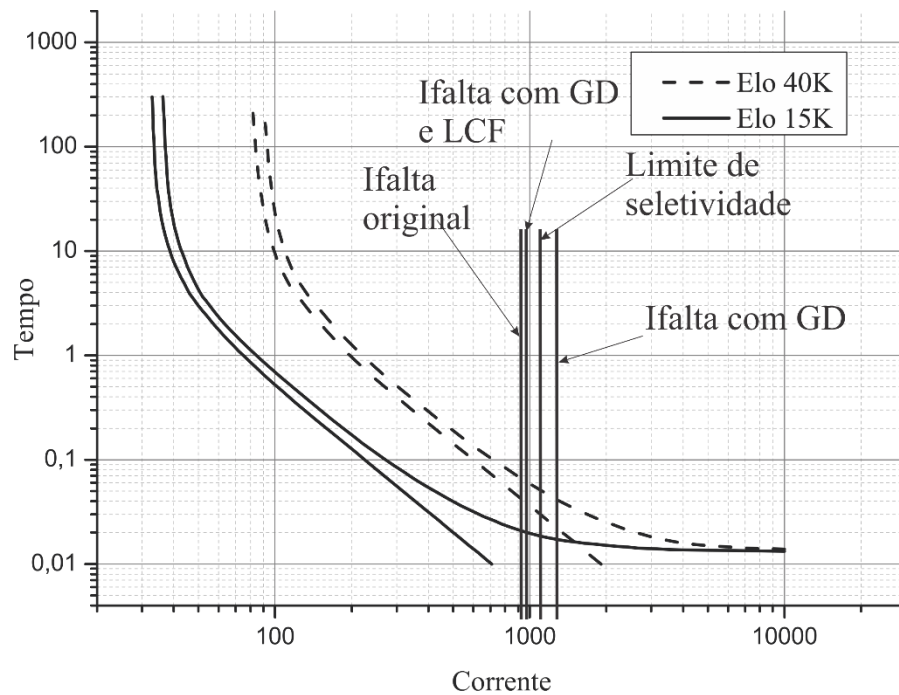


Figura 4.12 – Coordenograma para o caso E

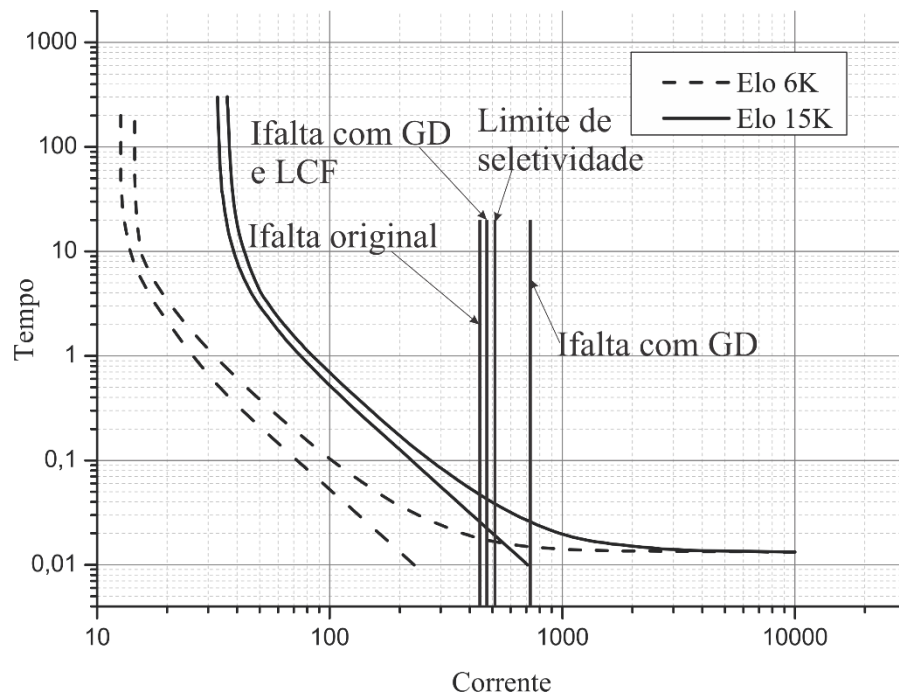


Figura 4.13 – Coordenograma para o caso F

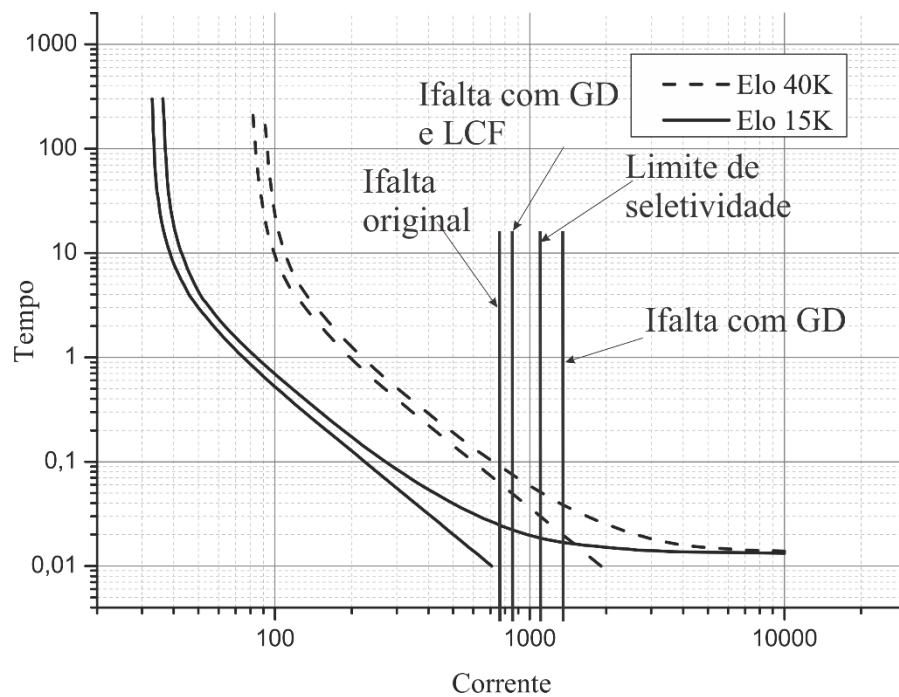


Figura 4.14 – Coordenograma para o caso G

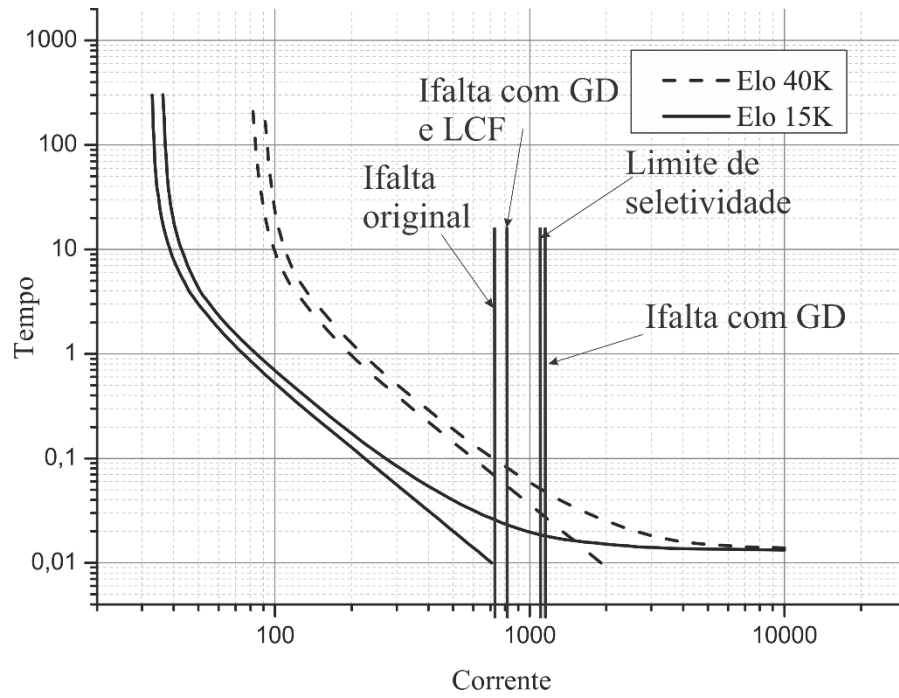


Figura 4.15 – Coordenograma para o caso H

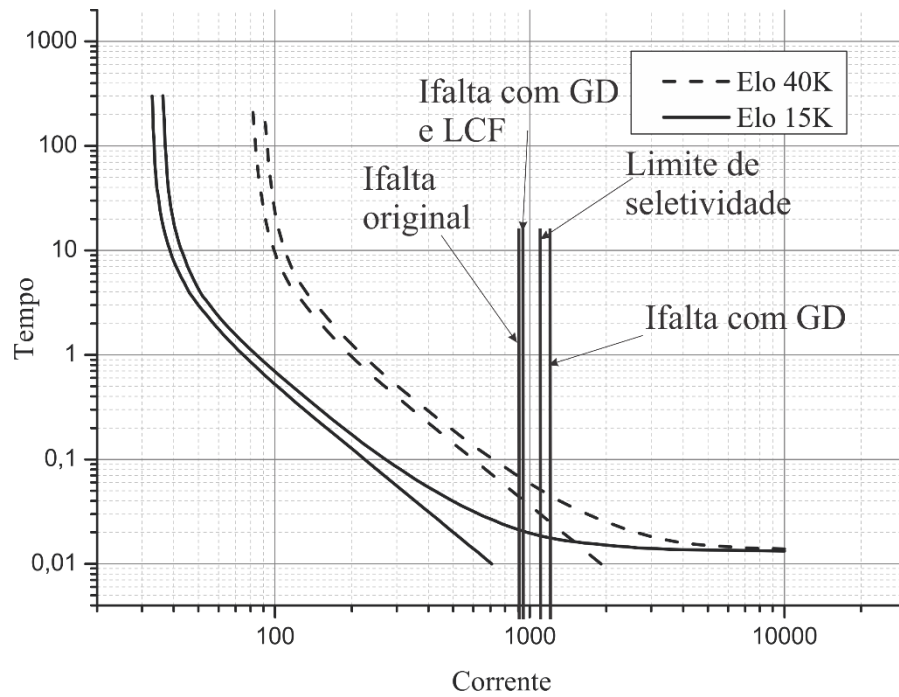
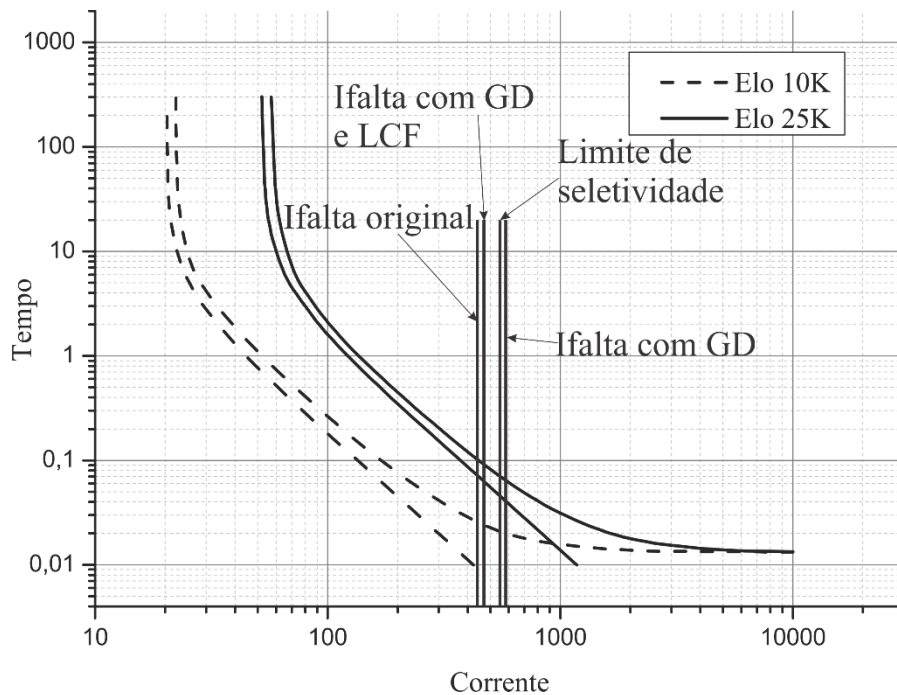


Figura 4.16 – Coordenograma para o caso I



#### 4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os resultados referentes ao método híbrido de alocação de dispositivos de proteção desenvolvido e também do método para adequação de sistemas de distribuição para acomodar as fontes de geração distribuída. A aplicação desses métodos foi capaz de reduzir indicadores de continuidade através da alocação de elos fusíveis e religadores, bem como permite a inserção de fontes de geração distribuída em qualquer nó do sistema, reduzindo a contribuição destas para as faltas através da alocação de limitadores de corrente de falta. Outro problema solucionado pelo método desenvolvido é a seleção da filosofia de operação do religador, dependendo da posição e contribuição da geração distribuída para a falta. Isso soluciona um problema recorrente de trabalhos da literatura, onde, durante a operação rápida do religador, a geração distribuída continua a alimentar a falta, causando a má operação do elo fusível. Também é garantida a manutenção da seletividade entre elos fusíveis na presença de geração distribuída, reduzindo as contribuições tanto da subestação quanto dos geradores distribuídos e mantendo as correntes de falta dentro de limites preestabelecidos.

## **5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

### **5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS**

Duas metodologias foram desenvolvidas neste trabalho com o intuito de solucionar problemas comumente enfrentados no projeto e operação de sistemas de distribuição de energia elétrica: a alocação de dispositivos de proteção e a minimização dos efeitos da inserção de geração distribuída nesses sistemas. Para solução do primeiro problema, uma metodologia híbrida para alocação, dimensionamento e coordenação de dispositivos de proteção foi desenvolvida, consistindo na utilização de regras heurísticas para alocação de elos fusíveis e contando com a alocação otimizada de religadores. O segundo problema foi solucionado através da alocação otimizada de limitadores de corrente de falta e mudança da filosofia operacional de religadores.

### **5.2 MÉTODO PARA ALOCAÇÃO DE DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO**

O método híbrido de alocação de dispositivos de proteção desenvolvido envolve a alocação heurística de elos fusíveis em sistemas de distribuição de energia elétrica, tendo como guia regras preestabelecidas. A alocação do religador é realizada utilizando algoritmo de enxame de partículas multiobjetivo, onde o intuito é a redução de indicadores de continuidade. Esta abordagem, ao contrário de diversas outras da literatura, visa simplificar o processo de alocação de dispositivos de proteção, permitindo ao usuário a utilização de critérios personalizados para determinação dos locais de instalação de elos fusíveis. Os resultados obtidos se mostraram condizentes aos métodos baseados em otimização presentes na literatura. Isso mostra que a alocação heurística dos elos fusíveis é uma abordagem eficiente para o problema, reservando o processo de otimização para alocação de religadores. O método proposto apresenta o diferencial de, além de simplificar o processo de alocação de elos fusíveis e religadores, realizar tanto o dimensionamento quanto a coordenação dos dispositivos de proteção, fornecendo uma ferramenta robusta para análise e projeto destes.

### 5.3 MÉTODO PARA REDUÇÃO DA INFLUÊNCIA DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NA COORDENAÇÃO RELIGADOR – ELO FUSÍVEL

O problema da descoordenação religador – elo fusível em sistemas de distribuição com geração distribuída é um assunto amplamente abordado na literatura, porém, com graves erros de concepção. Os trabalhos pesquisados procuram reduzir essa descoordenação através da limitação da penetração de geração distribuída nos sistemas, de modo que a contribuição destas não afete a coordenação entre os dispositivos. Também, buscam reduzir o nível das correntes de curto-circuito, com o intuito de limitar estas à zona de coordenação delimitada pelas curvas características dos dispositivos. Nenhuma metodologia pesquisada considera aspectos de seletividade e coordenação em sistemas de distribuição com geração distribuída. Neste trabalho, o método desenvolvido considera a inserção de geradores distribuídos em sistemas de distribuição que contam com um sistema de proteção já projetado. A inserção das fontes de geração distribuída causam o aumento da corrente de curto-circuito, mas também o fluxo bidirecional de corrente. Além disso, a contribuição destas fontes causa violações de seletividade entre elos fusíveis. A solução para esse problema envolveu a alocação de limitadores de corrente de falta, com o intuito de eliminar quaisquer violações de seletividade observadas entre os elos fusíveis, quando da inserção de fontes de geração distribuída. Ainda, a filosofia de operação dos religadores é sugerida, visto que, dependendo do local de instalação das fontes de geração distribuída, estas podem continuar a alimentar a falta durante a operação rápida do religador, fazendo com que o sistema de proteção coordenado (*fuse saving*) se torne inválido. Para determinar os melhores locais para instalação dos limitadores de corrente de falta, um algoritmo de enxame de partículas multiobjetivo foi desenvolvido, buscando minimizar as violações de seletividade entre elos fusíveis e também a dimensão dos limitadores a serem instalados. Os resultados obtidos mostram que a abordagem realizada por esse trabalho soluciona o erro de concepção dos trabalhos da literatura, mantendo a seletividade entre elos fusíveis e ao mesmo tempo impedindo que a geração distribuída continue a contribuir para a falta durante a operação rápida do religador. Como não foi possível encontrar trabalhos que abordassem os problemas verificados na literatura, a validação do algoritmo foi realizada através da realização de uma busca exaustiva cobrindo todas as possíveis combinações de instalação de geração distribuída. Os resultados da busca exaustiva ficaram muito próximos dos resultados obtidos pelo método desenvolvido, validando o método proposto.

#### 5.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros na área, são apresentadas as seguintes sugestões:

- Investigar os efeitos dos diferentes tipos de GD;
- Incorporar a consideração de chaves de manobra nos sistemas de distribuição com GD e limitadores de corrente de falta;
- Combinar alocação de religadores e limitadores de corrente de falta no mesmo processo de otimização.

#### 5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram desenvolvidos métodos para solucionar dois problemas encontrados em sistemas de distribuição modernos: a alocação de dispositivos de proteção e a redução da influência de fontes de geração distribuída na coordenação de dispositivos de proteção quando inseridas nesse sistema. A solução proposta para o primeiro foi o desenvolvimento de uma metodologia híbrida para alocação, dimensionamento e coordenação dos dispositivos de proteção. O hibridismo vem da utilização de critérios heurísticos para alocação de elos fusíveis e otimização na alocação dos religadores. Além da alocação dos dispositivos, o dimensionamento e coordenação dos mesmos é realizado pela metodologia.

O problema da descoordenação dos dispositivos de proteção foi solucionado através da alocação otimizada de limitadores de corrente de falta. Uma importante falha em metodologias presentes na literatura foi solucionada, onde apenas a magnitude das correntes de falta é considerada. A mudança na filosofia de proteção dos religadores impede que, durante a operação rápida deste, as fontes de geração distribuída continuem alimentando a falta, não havendo tempo para eliminação do arco elétrico, levando à fadiga ou atuação do elo fusível.



**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ABDEL-GHANY, H. A.; AZMY, A. H.; ELKALASHY, N. I.; RASHAD, E. M.; **Optimizing DG penetration in distribution networks concerning protection schemes and technical impact.** *Electric Power Systems Research*, n. 128, pp. 113 – 122, 2015;

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL; **PRODIST – Procedimentos de distribuição**, 1999;

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL; **Resolução Normativa nº 345**, 2008;

BAGRIYANIK, M.; CAKAL, G.; BAGRIYANIK, F. G.; **The effect of fault current limiter size and type on current limitation in the presence of distributed generation.** *International Journal of Renewable Energy Research*, v. 3, n. 1, 2013;

BASSO, T., FRIEDMAN, N. R., **IEEE 1547 National Standard for Interconnecting Distributed Generation: How Could It Help My Facility?** National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, Colorado, 2003;

BEGOVIC, M.; PREGELJ, A.; ROHTAGI, A.; **Impact of renewable distributed generation on power systems**, 34th Hawaii International Conference on System Sciences, 2001;

BERNARDON, D. P., SPERANDIO, M., GARCIA, V. J., RUSSI, J., CANHA, L. N., ABAIDE, A. R., DAZA, E. F. B., “**Methodology for Allocation of Remotely Controlled Switches in Distribution Networks based on a Fuzzy Multi-Criteria Decision Making Algorithm**”, *Electric Power Systems Research*, nº 81, pp. 414-420, 2010.

BILLINTON, R.; JOUNAVITHULA, S. **Optimal switching device placement in radial distribution systems.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, V. 11, n. 3, pp. 1646-1651, 1996.

BRAHMA, S. M.; GIRGIS, A. A.; **Microprocessor-Based Reclosing to Coordinate Fuse and Recloser in a System with High Penetration of Distributed Generation.** In: *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, pp. 453 – 458, New York, NY, 2002;

BRAHMA, S.; GIRGIS, A.A.; **Development of Adaptive Protection Scheme for Distribution Systems With High Penetration for Distributed Generation.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 19, n.1, pp. 56 – 63, 2004;

BRASIL. Decreto 2.335, de 6 de outubro de 1997. **Constitui a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, autarquia sob regime especial, aprova sua estrutura regimental e o quadro demonstrativo dos cargos em comissão e funções de confiança e dá outras providências.** Presidência da república, 1997;

BRASIL. Lei n. 9427, de 26 de dezembro de 1996. **Instituição da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, –disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências.** Presidência da república, 1996;

BRAVO, C.M.A.A, ALBUQUERQUE, E.L, **Introdução ao Matlab**, Centro Nacional de Processamento de Alto Desempenho em São Paulo, Universidade Estadual de Campinas, 2015;

CAMPITELLI, E. M., PEREIRA, R. A. F., SILVA, L. G. W., MANTOVANI, J. R. S., “**Sistema Inteligente para Alocação, Especificação, Coordenação e Seletividade da Proteção em Redes Aéreas de Distribuição de Energia Elétrica**”, *XVII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica – SENDI*, 2006;

CELLI, G.; PILO, F. **Optimal sectionalizing switches allocation in distribution networks.** *IEEE Transactions on Powers Systems*. V. 14, n. 3, pp. 1167-1172, 1999.

CHAITUSANEY, S.; YOKOYAMA, A.; **Prevention of Reliability Degradation from Recloser – Fuse Miscoordination due to Distributed Generation.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.23, n.4, pp. 2545 – 2554, 2008;

CHEN, M.; ZHANG, C.; LUO, C.; **Adaptive evolutionary multi-objective particle swarm optimization algorithm.** *Control and Decision Conference*, v. 24, n. 12, pp. 1851-1855, 2009;

CPFL; **Proteção de redes aéreas de distribuição – sobrecorrente.** Norma Técnica. São Paulo, 2016;

DUGAN, R.C.; McDERMOTT, T. E.; **Distributed Generation.** *IEEE Industry Applications Magazine*, v.8, n. 2, 2002;

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

FERREIRA, G. D.; **Otimização da confiabilidade de sistemas de distribuição de energia elétrica: Uma abordagem considerando a seleção e alocação de dispositivos de proteção e manobras.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), 2009;

GEIDL, M.; **Protection of Power Systems with Distribution Generation: State of the Art.** ETH, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, EEH Power Systems Laboratory, Zurich – Suíça, 2007;

GIRGIS A.A.; BRAHMA S.M; **Effect of Distributed Generation on Protective Device Coordination in Distribution System,** *Large Engineering Systems Conference on Power engineering*, pp. 115 – 119, 2001.

GOLESTANI, S.; TADAYON, M.; **Optimal switch placement in distribution power system using linear fragmented particle swarm optimization algorithm preprocessed by GA.** *8<sup>th</sup> International Conference on the European Energy Market (EEM)*, pp. 537-542, 2011;

GÓMEZ, J. C.; MORCOS, M., M.; **Coordination of Voltage Sag and Overcurrent Protection in DG Systems**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, pp. 214 – 218, 2005;

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

GUARDA, F. G. K.; **Alocação e Dimensionamento de Limitadores de Corrente de Falta para Minimizar a Influência de Fontes de Geração Distribuída na Proteção de Sistemas Elétricos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012;

HADJSAID, N., CANARD, J., e DUMAS, F., **Dispersed generation impact on distribution networks**, *IEEE Computer. Applications in Power*, vol. 12, pp. 22–28, Apr. 1999;

HUSSAIN, B., SHARKH, S.M., HUSSAIN, S., ABUSARA, M. A., **An adaptive relaying scheme for fuse saving in distribution networks with distribution generation**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 28, n. 2, Abril 2013;

IEEE DISTRIBUTION PLANNING WORKING GROUP; **Radial Distribution Test Feeders**. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 6, n. 3, pp. 975 – 985, 1991;

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS - IEEE, **C37.2 – 2008 – IEEE Standard Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations**. 2008;

JENKINS, N.; EKANAYAKE; J. B.; STRBAC, G.; **Distributed generation**. The Institute of engineering and Technology, Londres, 2010;

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C.B.B; SCHMIDT, H.P.; *et al.* **Métodos de Otimização Aplicados a Sistemas Elétricos de Potência**. ISBN 85-905144-1-2, São Paulo, 2005.

KIM, J.S.; LIM, S. H.; KIM, J. C.; **Study on Application Method of Superconducting Fault Current Limiter for Protection Coordination of Protective Devices in a Power Distribution System**. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 22, n 3, 2012;

KUMAR, V.; MINZ, S.; **Multi-objective particle swarm optimization: An Introduction**. *Smart Computing Review*, v. 4, n. 5, 2014;

LEVITIN, G.; MAZAL-TOV, S.; ELMAKIS, D.; **Genetic algorithm for optimal sectionalizing in radial distribution systems with alternative supply**. *Electric Power Systems Research*, v. 31, n. 2, pp. 97 – 102, 1994.

LIM, S. H.; KIM, J. S.; KIM, M. H.; KIM, J. C.; **Improvement of Protection Coordination of Protective Devices Through Application of a SFCL in a Power Distribution System with a Dispersed Generation**. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. 22, n 3, 2012;

MAHMOUDIAN, A.; NIASATI, M.; KHANESAR, M. A.; **Multi objective optimal allocation of fault current limiters in power system.** *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 85, pp. 1-11, 2017;

MORANDI, A., **State of the art of superconducting fault current limiters and their application to the electric power system,** *Physica C*, n. 484, pp. 242 - 247, 2013;

NAIEM, A. F.; HEGAZY, Y.; ABDELAZIZ, A. Y.; ELSHARKAWY, M. A.; **A classification technique for recloser – fuse coordination in distribution systems with distributed generation.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.27, n.1, 2012;

PEREZ, R.; BEHDINAN, K. **Particle swarm approach for structural design optimization.** *Computers & Structures*, Vol. 85, Nº 19-20, pp. 1579-1588, 2007.

PHOLBORISUT, N., SAKSORNCHAI, T., EUA-ARPORN, B., **Evaluating the impact of distributed generation on protection system coordination using protection miscoordination index.** *8<sup>th</sup> Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Tailândia, 17-19 maio 2011;

POPOV, V. A., CANHA, L. N., FARRET, F. A., ABAIDE, A. R., RODRIGUES, M. G., BERNARDON, D. P., KÖNIG, A. L., COMASSETO, L., LICHT, A. P., **Algorithm of Reliability Optimization for Operational Planning of Distribution Systems.** *IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Latin America*. Pp. 523 – 528, 2004.

POPOVIC, D. H., GREATBANKS, J.A., BEGOVIC, M., PREGELJ, A., **Placement of distributed generators and reclosers for distribution network security and reliability.** *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, n. 27, pp. 398-408, 2005;

PREGELJ, A.; BEGOVIC, M.; ROHATGI, A.; **Recloser Allocation for Improved Reliability of DG-Enhanced Distribution Networks.** *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 21, n. 3, pp. 1442 – 1449, 2006;

ROSA, L. P.; TOLMASQUIM, M. T.; PIRES, J.C.L. **A reforma do setor elétrico no Brasil e no mundo: Uma visão crítica.** Rio de Janeiro. Ed. Relume Dumará, 2<sup>a</sup> ed., 1998;

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, pp. 682 – 688, 2014;

SILVA, G. W., PEREIRA, R. A. F., MANTOVANI, J. R. S., “**Allocation of Protective Devices in Distribution Circuits Using Nonlinear Programming Models and Genetic Algorithms**”, *Electric Power Systems Research*, nº 69, pp. 77-84, 2004;

SOUDI, F.; TOMSOVIC, K.; **Optimal Trade-offs in Distribution Protection Design.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 16, pp. 292 – 296, 2001.

SOUDI, F.; TOMSOVIC, K.; **Optimized distribution protection using binary programming.** *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 13, n. 1, pp. 218 – 224, jan. 1998.

*Referências Bibliográficas*

---

SOUDI, F.; TOMSOVIC, K.; **Towards optimized distribution protection design.** *Proceedings of the third International Conference on Power Systems Planning and operations.* Ivory Coast, jan.. 1997.

TANG, G., IRAVANI, M.R., **Application of a fault current limiter to minimize distributed generation impact on coordinated relay protection,** International Conference on Power Systems Transients, Montreal, Canada, junho 2005;

TOUNE, S.; FUDO, H.; GENGI, T.; FUKUYAMA, Y.; NAKANISHI, Y. **A reactive tabu search for service restoration in electric power distribution systems.** *IEEE International Conference on Evolutionary Computation.* 1998.

TUITEMWONG, K.; PREM RUDEEPREECHACHARN, S.; **Expert System for Protection Coordination of Distribution System with Distributed Generators.** *International Journal of Electrical Power & Energy Systems,* v. 33, n. 3, pp. 466-471, 2011;

## ANEXO A

PARÂMETROS DO ALGORITMO DE ENXAME DE PARTÍCULAS PARA  
ALOCAÇÃO DE LIMITADORES DE CORRENTE

<b>Parâmetro</b>	<b>Descrição</b>	<b>Valor</b>
MaxIt	Nº máximo de iterações	250
nPop	Tamanho do enxame	200
nRep	Tamanho do repositório	100
w	Inércia	0.5
wdamp	Taxa de amortecimento da inércia	0.99
c1	Coefficiente de aprendizado individual	1
c2	Coefficiente de aprendizado global	2
alpha	Taxa de inflação	0.1
beta	Pressão de seleção de líder	2
gama	Pressão de seleção de deleção	2
mu	Taxa de mutação	0.1

## ANEXO B

## EQUAÇÕES DAS CURVAS DOS DISPOSITIVOS DE PROTEÇÃO

Elo 6K:

$$t(i)_{\min\_fus} = 2,7i^6 - 68,3i^5 + 325,6i^4 - 833,2i^3 + 985,5i^2 - 1250,2i + 452,6$$

$$t(i)_{\max\_int} = 0,8i^6 - 72,8i^5 + 426,7i^4 - 1235,4i^3 + 1458,2i^2 - 1836,1i + 635,2$$

Elo 15K:

$$t(i)_{\min\_fus} = 6,9i^6 - 94,2i^5 + 534,3i^4 - 1606,6i^3 + 2403i^2 - 2412,5i + 895,2$$

$$t(i)_{\max\_int} = 6,4i^6 - 91,8i^5 + 547,8i^4 - 1733,7i^3 + 3064,4i^2 - 2878,9i + 1121,4$$

Elo 25K:

$$t(i)_{\min\_fus} = 17,2i^6 - 254,1i^5 + 1552,9i^4 - 5035,2i^3 + 9136,2i^2 - 8797,7i + 3514,6$$

$$t(i)_{\max\_int} = 15i^6 - 226,1i^5 + 1418,7i^4 - 4714,5i^3 + 8774,1i^2 - 8674,2i + 3561,2$$

Elo 40K:

$$t(i)_{\min\_fus} = 22,593i^6 - 361,64i^5 + 1758,5i^4 - 6453,7i^3 + 13266i^2 - 14484i + 6564,4$$

$$t(i)_{\max\_int} = 15,27i^6 - 361,64i^5 + 2400,7i^4 - 8460,3i^3 + 16692i^2 - 17483i + 7596,7$$

Elo 65K:

$$t(i)_{\min\_fus} = 19i^6 - 335i^5 + 2386i^4 - 9030i^3 + 19145i^2 - 21557i + 41545$$

$$t(i)_{\max\_int} = 24i^6 - 427i^5 + 3126i^4 - 12134i^3 + 26373i^2 - 30432i + 14567$$

Curvas religador:

$$t(i)_{\text{Rel\_rap}} = 1,7i^6 - 27,2i^5 + 185,1i^4 - 668,7i^3 + 1354,9i^2 - 1462,7i + 658,5$$

$$t(i)_{\text{rel\_len}} = -1,12i^6 + 18,61i^5 - 127,14i^4 + 459,58i^3 - 924,54i^2 + 977,13i - 420,69$$

## ANEXO C

## TABELAS DE SELETIVIDADE DE ELOS

Elo Protetor B (A)	Elo Protegido A (A)													
	8K	10K	12K	15K	20K	25K	30K	40K	50K	65K	80K	100K	140K	200K
	Máxima corrente de falta em B, que protegerá A													
6K		190	350	510	650	840	1060	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200
8K			210	440	650	840	1060	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200
10K				300	540	840	1060	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200
12K					320	710	1050	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200
15K						430	870	1340	1700	2200	2800	3900	5800	9200
20K							500	1100	1700	2200	2800	3900	5800	9200
25K								660	1350	2200	2800	3900	5800	9200
30K									850	1700	2800	3900	5800	9200
40K										1100	2200	3900	5800	9200
50K											1450	3500	5800	9200
65K												2400	5800	9200
80K													4500	9200
100K													2000	9100
140K														4000

Elo Protetor B (A)	Elo fusível protegido A (A)													
	8T	10T	12T	15T	20T	25T	30T	40T	50T	65T	80T	100T	140T	200T
	Máxima corrente de falta em B, que protegerá A													
1H	400	520	710	920	1200	1500	2000	3200	2540	3200	4100	5000	6100	15200
2H	240	500	710	920	1200	1500	2000	3200	2540	3200	4100	5000	6100	15200
3H	240	500	710	920	1200	1500	2000	3200	2540	3200	4100	5000	6100	15200
5H	240	500	710	920	1200	1500	2000	3200	2540	3200	4100	5000	6100	15200
8H	240	500	710	920	1200	1500	2000	3200	2540	3200	4100	5000	6100	15200



## ANEXO D

## DADOS DA EXECUÇÃO DO ALGORITMO

<b>Parâmetro</b>	<b>Descrição</b>	<b>Valor</b>
Tol	Tolerância admitida para a diferença entre correntes nas seções	100 A
Rmin	Limite inferior da resistência do limitador de corrente	0,01 $\Omega$
Rmax	Limite superior da resistência do limitador de corrente	10 $\Omega$
Xmin	Limite inferior da reatância do limitador de corrente	0,01 $\Omega$
Xmax	Limite superior da reatância do limitador de corrente	10 $\Omega$